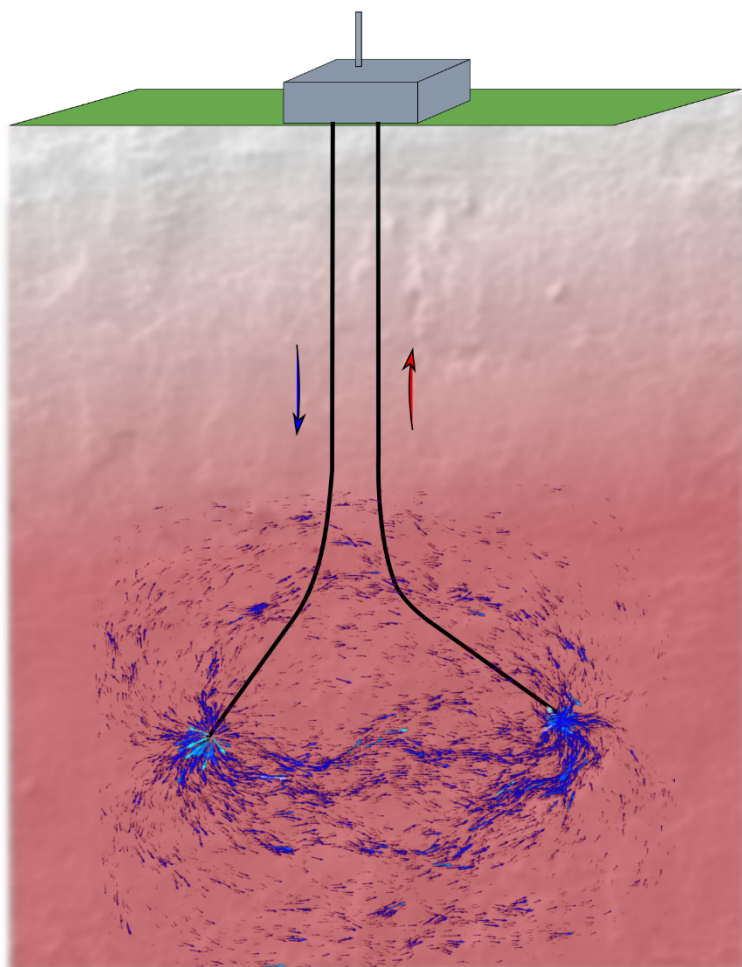


En utredning gällande djupbörning för geotermisk energi, samt därtill hörande miljöaspekter och riskhantering

Vägledande information för tillståndsmyndigheterna



Marja Uski och Kaiu Piipponen (red.)

Series Editor-in-Chief: Timo Tiira

Publisher: Institute of Seismology
P.O. Box 68
FI-00014 University of Helsinki
Finland
Phone: +358-294-1911 (switchboard)
<http://www.helsinki.fi/geo/seismo/>

Översättning från den finskspråkiga original rapporten: Selvitys geotermisen energian syväreikäpöraamisesta, siihen liittyvistä ympäristönäkökohdista sekä riskienhallinnasta

ISSN 0357-3060
ISBN 978-952-10-9600-6 (PDF)
Helsingfors 2020

Sammanfattning

Syftet med denna utredning är att ge bakgrundsinformation för myndighetsarbetet gällande geotermiska kraftverk och deras miljökonsekvenser. Geotermisk energi är ett växande område inom förnybar energiproduktion där Finlands tämligen kalla kristallina berggrund är en utmaning, som kräver nya tekniska lösningar. Ett geotermiskt kraftverk kräver djupborrning och till byggfasen hör ofta hydraulisk stimulering. Detta innebär en seismisk risk, vilket förutsätter specialåtgärder. Andra aspekter, bl.a. avfallshanteringen i borrhings- och produktionsfasen, bör också beaktas. Det är väsentligt att även vattentillståndet i sjöar, vattendrag och grundvattenområden observeras.

Utredningen gjordes på uppdrag av miljöministeriet, som även finansierade den. I arbetet deltog experter från Seismologiska institutet och Geologiska forskningscentralen. Avsikten är att klarlägga problematiken och eventuella risker i samband med den djupborrning som behövs när geotermisk energi utvinns. I rapporten ges rekommendationer angående gott förfarande till tillståndsmyndigheterna. Dessutom ges synpunkter på vad tillsynsmyndigheten bör förutsätta av den som ansöker om bygglov eller åtgärdstillstånd enligt markanvändnings- och bygglagen (132/1999) i projektets olika faser. Synpunkter på vilka andra åtgärder myndigheten bör beakta ges också. Rekommendationerna är inte förpliktande.

I början av rapporten presenteras seismiciteten och den seismiska övervakningen i Finland, samt information om olika geotermiska energiformer. Dessutom redogörs för erfarenheterna av projekt som genomförts i Finland före år 2019. Kapitel 4 behandlar riskhanteringen gällande inducerad seismicitet. Detta kapitel innehåller grundläggande information om den inducerade seismicitetens mekanismer, markrörelser, riskanalyser, samt om kraftverkens seismiska övervakning. Risken för att en geotermisk energianläggning skall orsaka en jordbävning är störst i byggfasen då man förbättrar bergets vattengenomsläpplighet genom hydraulisk stimulering. I den här fasen bör verksamheten övervakas speciellt noggrant.

Rekommendationer angående tillståndsansökans innehåll, kommunikation och verksamhetsövervakning ges i kapitel 5 och 6. I samband med tillståndsansökan skall den seismiska risken i kraftverksområdet och kraftverkets eventuella övriga miljökonsekvenser utredas. Den seismiska övervakningen, miljöövervakningen, arbetsplatsarrangemangen, borrhningstekniken, övervakningen av genomförandet, samt kommunikationen skall också redogöras i ansökan. Rekommendationerna för verksamhetsövervakningen ges utifrån kraftverkets livscykel för byggfasen (inklusive borrhning och stimulering), produktionsfasen och efterhandsövervakningen. Varje fas är dessutom uppdelad i seismisk övervakning och annan miljöövervakning.

I sammanfattningen i slutet av rapporten ges rekommendationerna i form av en koncis förteckning.

Innehåll

Sammanfattning.....	i
Innehåll	ii
Förkortningar som används i rapporten	iv
Ord och begrepp	v
Jordbävningstermer	v
Jordbävningens styrka.....	vi
Begrepp angående jordens struktur	vii
Begrepp angående värmebrunnar, stimulering och borrningsteknik	vii
1. Inledning	1
2. Seismicitet och seismisk övervakning i Finland.....	3
2.1 Seismologiska institutets myndighetsuppgifter	3
2.1 Seismiciteten i Finland	3
2.3 Den seismiska övervakningen i Finland.....	5
3. Geotermiska energiformer.....	7
3.1 Tillämpningar för utvinning av ytlig geotermisk energi.....	8
3.2 Djup geotermisk energi.....	9
3.3 Förstärkt geotermisk värmeproduktion, EGS.....	10
3.4 Geotermiska projekt i Finland (2019).....	13
4. Seismisk riskhantering vid djupa geotermiska kraftverk.....	15
4.1 Inducerad seismicitet	15
4.2 Tillåtna markrörelser	19
4.3 Bestämning av seismisk hasard och seismisk riskbedömning.....	21
4.3.1 Kartläggning av bakgrundsseismiciteten och naturlig seismisk hasard.....	22
4.3.2 Hasard gällande inducerad seismicitet	22
4.4 Det seismiska övervakningssystemet.....	24
4.4.1 Trafikljussystemet	26
4.4.2 Erfarenheter från stimuleringsfasen i Otnäs kraftverksprojekt	28
5. Rekommendationer för tillståndsansökningar gällande djupa geotermiska kraftverk.....	31
5.1. Bakgrundsutredningar	31
5.1.1 Kartläggning av seismiska risker i området	32
5.1.2 Kartläggning av tillåtna markrörelser	32
5.1.3 Bedömning av miljökonsekvenser.....	33
Markanvändning	33

Naturobjekt	34
Geologi	34
Vatten.....	34
Grundvatten.....	34
Borravfall.....	35
Radioaktiva ämnen och strålning.....	36
Damm.....	37
Buller och vibrationer under byggfasen.....	37
Trafik	38
Hantering av kemikalier	38
Anläggningens energieffektivitet och klimatesiliens	39
5.2 Övervakning och beredskapsplaner	39
5.3 Planen för byggnadsplatsområdet, redogörelse för borrhälsningen.....	40
5.4 Kommunikationsplan	41
6. Rekommendationer gällande uppföljningen och övervakningen av kraftverkets drift	43
6.1 Byggfasen	43
Seismisk övervakning	43
Miljöteknisk övervakning	44
6.2 Produktionsfasen	44
Seismisk övervakning	44
Miljöteknisk övervakning	44
6.3 Efterhandsövervakningen	45
Seismisk övervakning	45
Miljöteknisk övervakning	45
7. Sammanfattning.....	46
Källor	48
Bilagor	53
Bilaga 1: Material från observationsrapporter	53
Bilaga 2: GRID.....	55

Förkortningar som används i rapporten

ATLS – Adaptive Traffic Light System, Anpassningsbart trafikljussystem

BAT – Best Available Techniques, Bästa tillgängliga teknik

BREF – Best available techniques Reference Document, Referensdokument för bästa tillgängliga teknik

CO₂ – Koldioxid

DSHA – Deterministic Seismic Hazard Analysis, Deterministisk seismisk hasardanalys

EGS – Enhanced Geothermal System, Förstärkt geotermiskt system

NTM-centralen – Närings-, trafik- och miljöcentralen

FENCAT – Jordskalvskatalog över Fennoskandia

GRID – Geothermal Risk of Induced seismicity Diagnosis, Riskhanteringsverktyg för inducerad seismicitet

GTK – Geologiska forskningscentralen

MBL – Markanvändnings- och bygglagen

PGA – Peak Ground Acceleration, Maximal markacceleration

PGV – Peak Ground Velocity, Maximal markhastighet

PSHA – Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Sannolikhetsbaserad seismisk hasardanalys

RIL – Finlands byggnadsingenjörsförbund

STUK – Strålsäkerhetscentralen

TLS – Traffic Light System, Trafikljussystem

MSL – Miljöskyddslagen

Ord och begrepp

Jordbävningstermer

Azimutlucka: Azimutvinkeln är vinkeln mellan två närbelägna observationsstationer från epicentret sett. Azimuterna anges i grader och mäts medsols från norr. Azimutluckan ska vara så liten som möjligt (under 90°) för att man tillförlitligt ska kunna beräkna källdata för en jordbävning (hypocentrum, lösning för förkastningsplanet).

Epicentrum: Punkten på jordytan rakt ovanför en jordbävningens fokus. Dess koordinater anges i bredd- och längdgrader.

Hypocentrum: Jordbävningens fokus, dvs. platsen där utlösningen av spänningen börjar. Förutom koordinaterna anges på vilket djup jordbävningen inträffade.

Inducerad jordbävning: En av människan förorsakad jordbävning, som en följd av förändringar i spänningstillståndet. Skälvet skulle annars inte ha inträffat. Förändringar i spänningstillståndet, vilket kan inducera jordbävningar, kan orsakas av t.ex. gruvdrift, vattenmassors tyngd i närheten av stora dammbassänger, samt av injicering av vatten i berggrunden.

Efterskalv: Ett svagare skalv i samma område där ett starkt skalv tidigare inträffat. Det kan komma flera efterskalv, t.o.m. flera hundra.

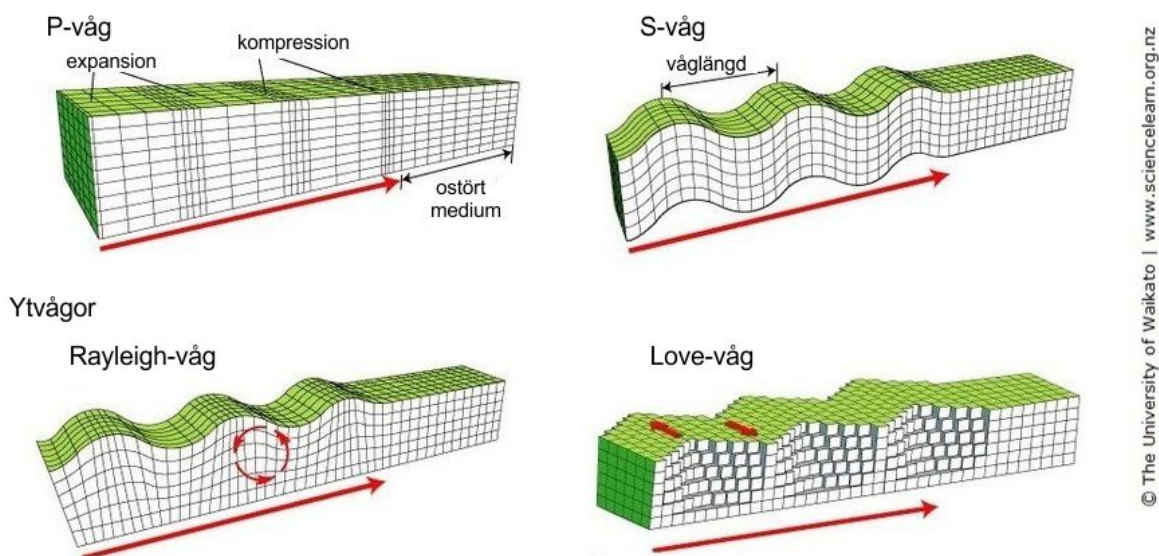
Naturlig/tektonisk jordbävning: Skakning av markytan orsakad av en plötslig frigörelse av spänningsenergi lagrad i berggrunden.

Mikrojordbävning: En liten jordbävning som i allmänhet observeras endast med seismiska mätinstrument. Inom jordbävningssismologin avses med mikrojordbävning ett skalv vars styrka (magnitud) är mindre än M 2–3. För hydraulisk stimulering är gränsen ofta M 0.

Seismisk våg: En impuls, dvs. en vågrörelse orsakad av en jordbävning eller en sprängning i jordens inre (P- och S-vågor) eller i ytskiktet (Rayleigh- och Love-ytvågor). P-vågen är liksom ljudvågen en longitudinell vågrörelse. S- och Love-vågen är en transversell vågrörelse och är långsammare än P-vågen. Rayleigh-vågen består av både en longitudinell och en transversell vågrörelse och är den långsammaste vågen. Skillnaderna i vågornas hastighet utnyttjas vid lokalisering av händelser. (Figur i.)

Lösning för förkastningsplanet: Beskriver en jordbävning med hjälp av två förkastningsplan som rör sig i förhållande till varandra. Lösningen för förkastningsplanet ger information om i vilken riktning en förkastning har rört sig (eng. strike) mätt medsols från norr, om stupningen (eng. dip) i förhållanden till

markytan och om skjuvningsvektorns riktning på förkastningsplanet (eng. rake). Lösningen innehåller också en bedömning gällande spänningsfältets riktningar och karaktär, vilket omger skalvkällan.



Figur i: 3D-bild av de seismiska vågtyperna. Källa: Science Learning Hub – Pokapū Akoranga Pūtaiao, University of Waikato, <http://www.sciencelearn.org.nz>.

Jordbävningens styrka

Intensitet, eller dess fullständigare benämning makroseismisk intensitet, beskriver storleken på en jordbävningens effekter. Intensiteten är ett heltal som ger en koncis bild av storleken på en jordbävningens konsekvenser på en viss plats. Den uttrycks med en 12-gradig skala vars steg traditionellt anges med romerska siffror. Intensitet II är den minsta en människa kan uppfatta, och den högsta graden XII motsvarar total förstörelse. Kosmetiska skador börjar uppkomma när intensiteten är V eller VI.

Magnituden beskriver en jordbävningens styrka vid själva skalvkällan. Magnituden grundar sig på maximivärdet på en jordrörelse registrerad av en seismisk station och den anges med någon logaritmisk magnitudskala. En ökning av magnituden med en enhet innebär att markrörelsen ökar 10 gånger och den frigjorda seismiska energimängden 30 gånger. De använda magnitudskalorna har relaterats till varandra, så det rekommenderas att den gemensamma symbolen M för de olika magnituderna används, förutsatt att det inte är nödvändigt att ange hur mätningen utförts.

Seismisk hasard beskriver nivån på den naturliga seismiciteten i ett visst område. Det är vanligt att man vid statistisk bedömning av den seismiska hasarden anger sannolikheter för att det i ett visst område under en given tid ska inträffa jordbävningar av en viss storlek, eller för att det p.g.a. dessa ska ske jordrörelser av en viss storlek. Mänsklig aktivitet inverkar inte på nivån av den naturliga seismiska hasarden.

Seismisk risk anger seismicitetens inverkan på den byggda miljön i ett visst område. Den ger en uppskattning om vilka skador och kostnader en större jordbävning skulle kunna orsaka. Den seismiska risknivån kan sänkas genom att t.ex. bygga hus som klarar jordbävningar av en viss storlek.

Begrepp angående jordens struktur

Akvifer: Underjordisk grundvattenförekomst.

Jordskorpa: Jordens yttersta skikt. Den är tunnast under oceanerna och tjockast under kontinenternas bergsområden. I Finland är jordskorpan 40–60 km tjock.

Jordskorpans spänningsfält: Spänningsfältet är tredimensionellt och beskrivs med hjälp av storlek, riktning och stupning för tre huvudspänningskomponenter σ_1 , σ_2 , σ_3 (störst, mellersta, minsta) vilka är vinkelräta mot varandra. I Finland är den största komponenten i allmänhet nästan horisontal och orienterad i nordväst-sydöstlig riktning. Spridningen i mätresultaten är stor, i synnerhet i berggrundens ytskikt.

Förkastning: En svaghetspunkt i jordskorpan där berggrunden har krossats och förskjutits. En förkastning klassificeras som aktiv ifall den under de senaste 10 000 åren har visat observerbar rörelse eller seismicitet.

Postglacial förkastning: En aktiv förkastning som bildats efter den senaste istiden.

Begrepp angående värmebrunnar, stimulering och borrningsteknik

Låg geotermisk energi = geoenergi = jordvärme: I denna rapport används dessa termer likvärdigt för att beskriva under 500 m djupa värmeöverföringssystem.

Djup geotermisk energi = geotermisk energi: I denna rapport används dessa termer för att beskriva över 500 m djupa värmeöverföringssystem.

Värmebrunn = bergvärmebrunn = energibrunn: Värmeöverföringsrör placerade i borrhål. Termen brunn används för både grunda och djupa borrhål i geotermiska kraftverk.

Borrkax: Stendamm eller stenfragment som bildats under borrning (eng. *cutting*, *chipping*).

Stimulering: Vidgning av sprickor med målet att på önskat djup förbättra bergets vatten-genomsläpplighet, dvs. permeabilitet. En övergripande term för olika vidgningsmekanismer, såsom kemisk stimulering och hydraulisk stimulering, till vilken hör spräckning (eng. *fracturing*) och inducerad skjuvning (eng. *shearing*).

Hydraulisk stimulering: Vidgning av sprickor genom injicering av stora mängder vatten in i borrhålet.

Spräckning: Används för samma ändamål som begreppet *hydraulisk stimulering*, men tekniskt avses med spräckning endast vidgning av **dragsprickor** (se figur 6, kapitel 4.1).

Dragspricka = extensionsspricka: En spricka som tensionsspänningen (spänning som verkar vinkelrätt mot den minsta spänningskomponenten) ger upphov till. Först expanderar sprickan vinkelrätt mot sprickväggarna och därefter fortsätter den i sprickans riktning (se figur 6, kapitel 4.1).

1. Inledning

Utnyttjandet av geotermisk värme är ett alternativ för att ersätta fossila bränslen med förnybara och utsläppssnåla energiproduktionsformer. Djupt nere i jordskorpan finns en i praktiken utesluten reservoar av värmeenergi, vilken i Finland kan användas för uppvärmning. I finländska förhållanden måste man borra djupt ner i jordskorpan för att få upp tillräckligt med värmeenergi. Branschen växer och nya lösningar utvecklas för att utnyttja värmereservoaren. I Finland pågår flera kraftverksprojekt. Av dessa har energibolaget St1:s Deep Heat-projekt i Otnäs i Esbo kommit längst.

Utnyttjandet av geotermisk energi indelas i ytlig och djup geotermisk energiproduktion. Utvinningen baserar sig på att man cirkulerar vatten i marken eller berggrunden. Borrhålen i ett värmekraftverk med djup geotermisk energiproduktion kan vara upp till åtta kilometer djupa. Syftet med det s.k. förstärkta geotermiska systemet (Enhanced Geothermal System, EGS) är att förbättra vattenflödet mellan borrhålen genom att förstora sprickorna i berggrunden. Genom att injicera vatten med högt tryck åstadkommer man en förändring i berggrundens spänningstillstånd och får stenarnas gränssytor att skifta. Denna rörelse yttrar sig i små jordbävningar som kan observeras med seismiska mätinstrument. EGS-värmekraftverk kan också orsaka större jordbävningar. Dessa förorsakar i huvudsak störande ljud och vibrationer i kraftverkets närområde, men smärre egendoms- och byggnadsskador är också möjliga. Därför är det viktigt att utreda jordbävningsrisken i området innan verksamhet inleds, och informationen bör uppdateras under kraftverkets hela livscykel. Under byggfasen av ett EGS-kraftverk är seismisk övervakning i realtid oundviklig med tanke på den allmänna säkerheten. Ett omfattande övervakningssystem är även i verksamhetsutövarens intresse eftersom det förbättrar möjligheterna att följa utvecklingen av sprickzonerna. Dessutom hjälper övervakningen med att skilja mellan kraftverkets inducerade skalv och olägenheter orsakade av annan seismicitet.

Det har inte tidigare gjorts någon utredning gällande miljöriskerna förknippade med geotermiska energianläggningar i den slags geologisk miljö som finns i Finland. Geotermiska kraftverk nämns inte bland direktivanläggningarna i bilaga 1 till EU:s industriutsläppsdirektiv (2010/75/EU). Utvinning av geotermisk energi nämns inte heller i bilaga 2 till miljöskyddslagen (527/2014, MSL), och inte bland de verksamheter som kräver miljötillstånd enligt statsrådets förordning om miljöskydd 713/2014. På EU-nivå har det inte utvecklats någon bästa tillgänglig teknik, så kallad BAT- eller BREF-dokumentation, för geotermisk energiutvinning. Anläggningar för utvinning av geotermisk energi ingår inte heller i projektförteckningen i bilaga 1 till lagen om förfarandet vid konsekvensbedömning (252/2017, MKB-lagen), och därmed krävs det inte automatiskt någon bedömning av deras miljökonsekvenser.

I nuvarande lagstiftning betraktas således inte geotermisk energiutvinning, åtminstone inte i alla fall, som miljöfarlig verksamhet eller verksamhet som medför olägenhet. Särskild uppmärksamhet bör fästas vid eventuella miljökonsekvenser i samband med att tillstånd beviljas. I enskilda fall bör övervägas om projektet förutsätter att förfarandet vid miljökonsekvensbedömning tillämpas eller om ett miljötillstånd behövs.

I samband med ansökan om tillstånd för kraftverket i Otnäs ålade miljöministeriet NTM-centralerna att ge städerna anvisningar. Esbo stad tillämpade anvisningarna gällande anläggande av jordvärme- och energibrunnar (Ympäristöministeriö 2013) vid behandlingen av tillståndet för kraftverket. Dessutom bemyndigade staden Seismologiska institutet att bedöma St1:s kontrollsystem angående inducerad seismicitet samt att övervaka dess funktion.

Då den geotermiska kraftverkstekniken blir vanligare krävs en översyn av lagstiftningen angående saken, samt eventuella revideringar i fråga om byggande och produktion vid utvinning av geotermisk energi. Även myndighetskompetens, samarbete och behövliga resurser är nödvändiga. Viktiga aspekter i lagstiftningen gällande geotermiska kraftverk är i synnerhet den inducerade seismiciteten samt markanvändnings- och grundvattenfrågorna. När denna rapport skrevs var läget det att man i tillståndsförfarandet för en geotermisk energianläggning tillämpat bestämmelser i markanvändnings- och bygglagens (132/1999, MBL) 126 § om åtgärdstillstånd eller 125 § om bygglov. Ifall läget eller andra omständigheter kräver att förfarandet vid miljökonsekvensbedömning tillämpas och/eller om det behövs ett miljötillstånd enligt miljöskyddslagen, skall detta beaktas vid behandling av tillståndsansökan. I denna text behandlas tillstånden och handläggarna av dem på en allmän nivå. Tillståndssökande skall utreda vilka dessa är innan ansökan lämnas in.

Syftet med denna rapport är att ge myndigheterna i Finland grundläggande information gällande geotermisk energi och om den därtill relaterade inducerade seismiciteten, samt om djupborrningens övriga miljökonsekvenser. Rapporten innehåller rekommendationer gällande åtgärder vilka lindrar risken förknippad med inducerad seismicitet under anläggningens bygg- och drifttid. Anvisningarna baserar sig på tillbudsstående internationell litteratur och är tillämpad till de geologiska och seismiska förhållandena i Finland. För att stödja tillståndsförfarandet har vid utarbetande av anvisningarna dessutom tillämpats miljöförvaltningens allmänna anvisningar om miljötillstånd (www.ymparisto.fi/sv-FI). I rapporten har även Seismologiska institutets erfarenheter från den seismiska övervakningen av den första borrhings- och stimuleringsfasen vid St1:s anläggningsplats utnyttjats. Anvisningarna innehåller ett separat avsnitt gällande kommunikation för att de lokala beslutsfattarna och allmänheten skall få en klar uppfattning om projektets bakgrund, genomförande och de säkerhetsåtgärder som bör vidtas.

Utredningen gjordes på uppdrag av miljöministeriet, som också finansierade den. I arbetet deltog experter från Seismologiska institutet och Geologiska forskningscentralen. Vid Seismologiska institutet utarbetades rapporten under ledning av FL Marja Uski. I arbetet deltog FM Kaiu Piipponen, FM Katriina Arhe och FM Kati Oinonen. Vid Geologiska forskningscentralen ansvarade FD Teppo Arola för arbetet. I arbetet deltog även FD Jaana Jarva, FD Jussi Mattila och FM Hannu Lahtinen. Svensk översättning av översättnings- och språktjänsten vid Statsrådets kansli och NaK Jennifer Hällsten.

2. Seismicitet och seismisk övervakning i Finland

2.1 Seismologiska institutets myndighetsuppgifter

Seismologiska institutet grundades 1961, och har sedan dess ansvarat för den seismiska övervakningen i Finland. Institutet har myndighetsuppgifter baserade på avtal och lagstiftning, vilka berör hanteringen av seismiska risker samt övervakningen av avtalet om förbud av kärnvapenprov. Den grundläggande förutsättningen för denna verksamhet är seismisk observationsverksamhet och upprätthållandet av ett nationellt seismiskt nätverk. Allmänheten kontaktar institutet bl.a. till följd av olika vibrations- och ljudobservationer, och när det sker stora jordbävningar runtom i världen. I dagens läge kommer de flesta förfrågningarna via observationsformuläret på institutets webbplats.

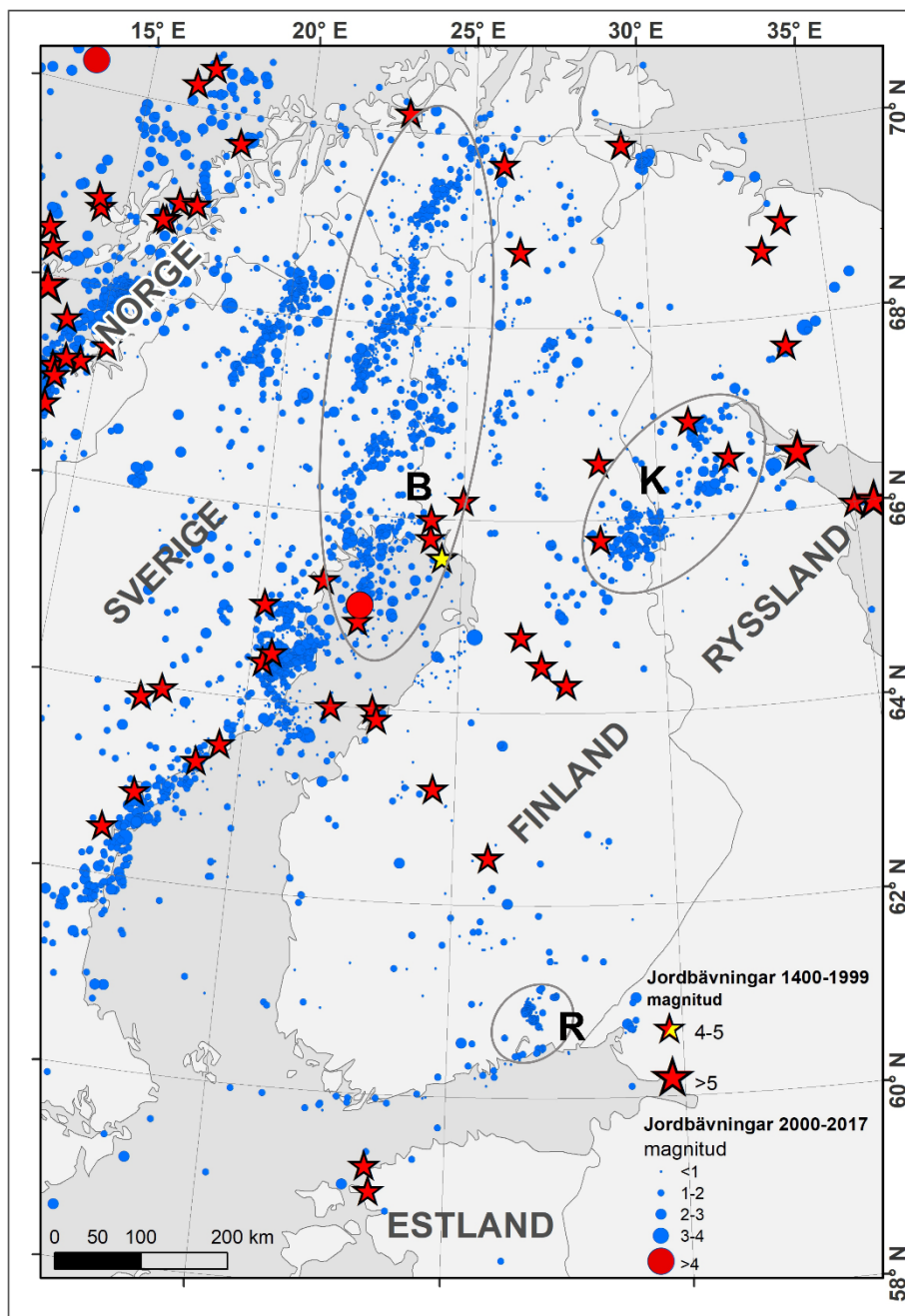
Lagstiftnings- och anvisningsarbetet i anknytning till driften av geotermiska kraftverk har bara börjat. I samband med kraftverksprojektet i Otnäs fanns det oklarheter i fråga om Seismologiska institutets befogenheter och ansvar som övervakande instans. Det fanns även oklarheter gällande finansieringen av de resurser i form av utrustning och arbetskraft, vilka den nya uppgiften krävde. Seismologiska institutet anser sin uppgift vara att i första hand stödja tillsyns-, tillstånds- och regleringsmyndigheterna. Utöver detta kan institutet även ta ansvar för projektens seismiska övervakning och seismologiska analys, om dessa uppgifter ger betydande fördelar genom synergi med de nuvarande uppgifterna och med det nationella observationsnätet. Det är viktigt att i varje enskilt fall och genast då ett projekt inleds fastställa deltagarnas roller och ansvarsområden, samt finansieringsarrangemangen.

2.2 Seismiciteten i Finland

Finland är beläget i den inre delen av Eurasiska kontinentalplattan långt från dess aktiva plattkanter. I global skala är den naturliga seismiciteten liten och i allmänhet har jordbävningarna en magnitud under M 4. Största delen av skalven sker i jordskorpanns övre delar på cirka 1–15 km djup. Seismiciteten beror på processer som sker både vid plattgränserna och i plattans inre delar. Bland dessa processer kan nämnas öppningen av Mittatlantiska ryggen, landhöjningen efter den senaste istiden och variationer i spänningstillståndet till följd av strukturskillnader i jordskorpan. I Finlands berggrund är spänningsfältets största komponent i allmänhet horisontal och orienterad i nordväst-sydöstlig riktning (Heidbach m.fl. 2016). Huruvida förkastningar aktiveras beror på deras djupstruktur och orientering i förhållande till spänningsfältet i området (Koskinen, 2013; Mattila 2015; Kaisko 2018).

I figur 1 ges en sammanfattning av de jordbävningar som observerats i Finland och närområdena under 2000-talet, samt de seismiskt mest aktiva zonerna. Mest jordbävningar sker i norra Finland i förkastningszoner som är orienterade i nordost-sydvästlig eller i nordväst-sydöstlig riktning. I den seismiskt aktiva zon som sträcker sig från Bottenviken längs gränsen mellan Finland och Sverige till Nordnorge (Figur 1, B) hör skalven i huvudsak ihop med postglaciala förkastningar, vilka bildats efter den senaste istiden. En annan seismiskt aktiv zon sträcker sig från Kuusamo till nordvästra Ryssland

(Figur 1, K). Denna består av en vidsträckt förkastningszon orienterad i nordost-sydvästlig riktning och av mindre förkastningar som klyver denna zon i olika riktningar. I landets södra delar är seismiciteten mer utspridd. Ett undantag utgör rapakivgranitområdet i sydöstra Finland (Figur 1, R) där det under hela den skrivna historiens tid skett svärmar av ytliga (1–2 km djupa) jordbävningar. Den senaste stora



Figur 1: Nuvarande seismicitet i Finland och dess närområden. Observationerna 2000–2017 är markerade med cirklar. Jordbävningarna med $M > 4$ som skett 1400–1999 är markerade med stjärnor. Jordbävningen 1882 med $M = 4,6$ är markerad med gul stjärna. De seismiskt mest aktiva områdena Bottenviken-Nordnorge (B), Kuusamo-Kandalaksha (K) och rapakivområdet i sydöstra Finland (R) har avgränsats med grått. Källa: Jordskalvskatalog över Fennoskandia (FENCAT, <https://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/catalog/FENCAT.html>).

svärmen inträffade under åren 2011–12 och bestod av över 200 händelser, av vilka den största hade en magnitud på M 2,9.

Den största kända jordbävningen i Finland under historisk tid inträffade den 23 juli 1882 i Bottenviken (Figur 1, gul stjärna). Dess styrka har uppskattats till M 4,6 och den orsakade lindriga skador på byggnader i kuststäderna (Mäntyniemi & Wahlström 2013). Det största skalv som registrerats med mätinstrument (M 3,6) inträffade den 17 februari 1979 i Lappajärvi. Av figur 1 framgår att de största skalven inte är koncentrerade till enbart kända seismiskt aktiva zoner. Flera av dem har skett i områden som tidigare ansågs vara t.o.m. icke-seismiska (Korja m.fl. 2015.).

I områden med låg seismicitet, till vilka Finland hör, är det svårt att på förhand fastställa enskilda förkastningars aktivitet, eftersom jordbävningar sker så sällan. De större jordbävningarna har en återkomstintervall på t.o.m. tiotals tusen års. Eftersom vår berggrund är relativt fragmenterad så är förkastningarna i huvudsak korta. Det finns dock också några större förkastningar i Finland. Enligt vissa bedömningar har de största förkastningarna en hypotetisk risk för en jordbävning med nästan M 7 (Korja m.fl. 2015; Ojala m.fl. 2018).

2.3 Den seismiska övervakningen i Finland

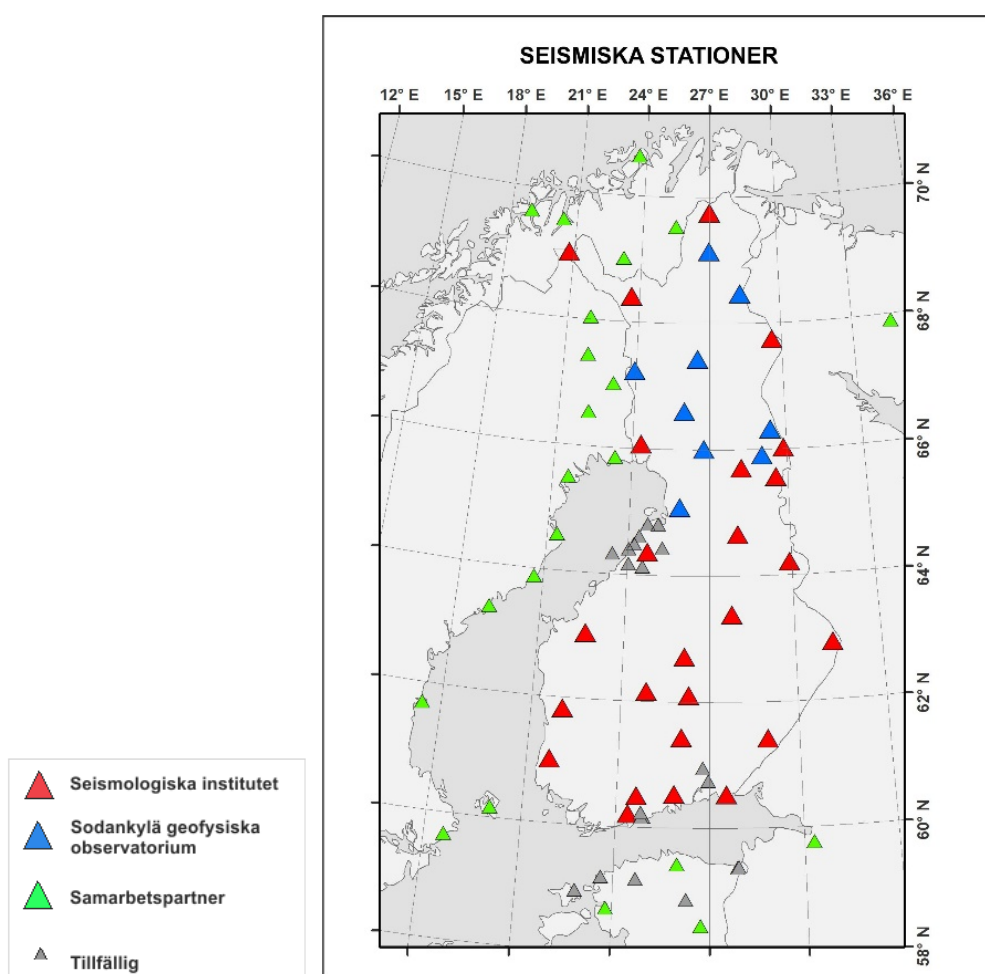
För närvarande finns det över 30 permanenta seismiska stationer i Finland. Dessutom finns det tillfälliga stationer i områden som kräver närmare undersökningar (Figur 2). Nästan alla stationer är kopplade till Seismologiska institutets servrar via en i realtid fungerande dataförbindelse. Från servrarna överförs registreringarna till normala analys- och arkiveringssystem. Registreringsmaterial i realtid erhålls också från seismiska stationer, vilka upprätthålls av samarbetspartners i grannländerna (Kortström m.fl. 2018).

Vid Seismologiska institutet har det utvecklats ett automatiskt lokaliseringssystem som fungerar nästan i realtid. Systemet grundar sig dels på att seismiska signaler separeras från bakgrundsbruset, dels på att bestämma varifrån en signal kommer med hjälp av trekomponentsregistreringar, samt dels på att kombinera observationer från flera stationer. Systemet innehåller också en automatisk identifieringsmetod av händelser baserad på artificiell intelligens (Kortström m.fl. 2016). Denna metod skiljer sannolika jordbävningar från andra observationer. Det nationella stationsnätets tröskelmagnitud är M 1. Detta betyder att stationsnätet kan registrera seismiska händelser vilka skett inom nätet om deras magnitud är 1 eller större (Kortström m.fl. 2018). Inom täta, tillfälliga nät är tröskelmagnituden betydligt lägre, t.o.m. så låg som M 0.

Seismologiska institutet registrerar årligen cirka 16 000 seismiska händelser i Finland och dess när-områden. Av dessa är 1–2 % jordbävningar och resten är huvudsakligen sprängningar eller ras kopplade till byggnads- och gruvverksamhet. I samband med den dagliga analysen kontrolleras de automatiska resultaten och jordbävningarna analyseras på nytt manuellt. När det gäller sprängningar och ras

koncentreras analysen i första hand på större händelser, vilka antingen observerats av människor eller orsakat skador.

Seismologiska institutet upprätthåller jordbävningskatalogen över Fennoskandia (FENCAT; Ahjos & Uski 1992, <https://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/catalog/FENCAT.html>), vilken innehåller uppgifter om jordbävningsobservationer från mer än sex århundraden. FENCAT är områdets mest omfattande öppna jordbävningskatalog och används i stor utsträckning som referens i forskning angående seismicitet. Institutets observationsverksamhet är offentlig och transparent – uppgifter om seismiska händelser och rapporter publiceras på dess webbplats och nästan alla permanenta stationers registreringsmaterial finns även tillgängligt på nätet (Seismologiska institutet 2019).



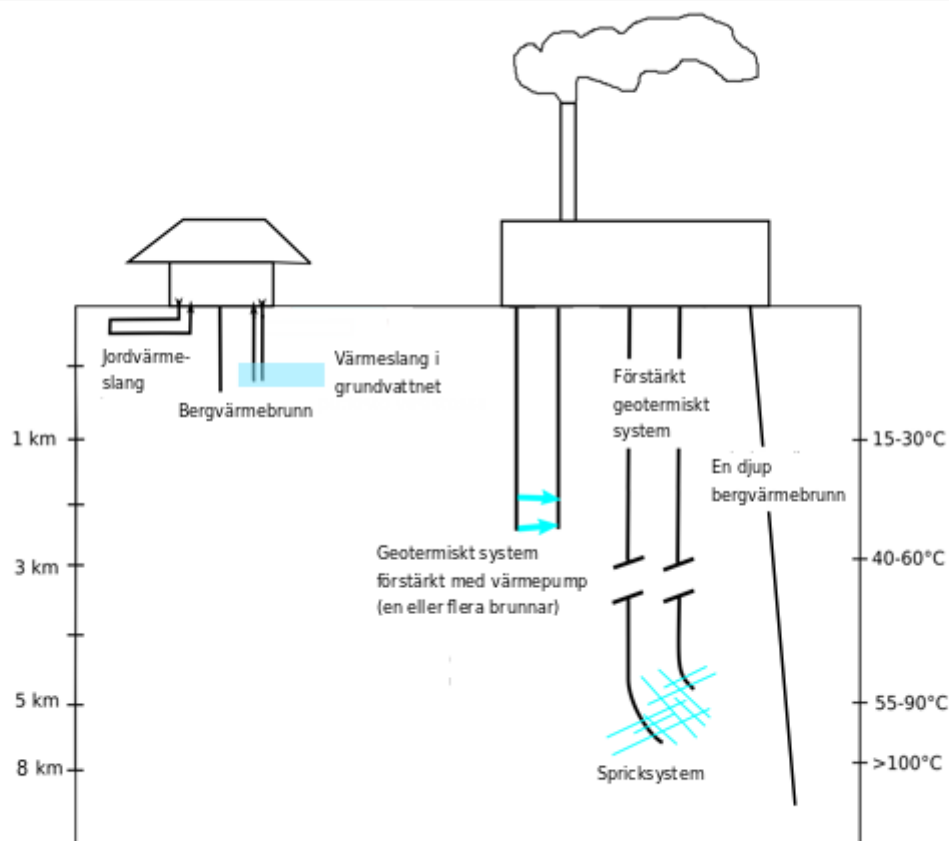
Figur 2: Finlands seismiska stationsnät 2018.

3. Geotermiska energiformer

Utnyttjandet av geotermisk energi indelas i ytlig och djup geotermisk energiproduktion. I de nordiska länderna används termerna *geoenergi* eller *jordvärme* för att beskriva ytlig geotermisk energi och termen *geotermisk energi* för djup geotermisk energi. Ytlig geotermisk energi kan utnyttjas för uppvärmning och nedkylning, djup geotermisk energi dessutom för elproduktion. Gränsen mellan de två formerna definieras i Finland till ett djup på cirka 300–500 m under jordytan.

De i finländska förhållanden använda systemen för utvinning av ytlig och djup geotermisk energi är sammanfattade i figur 3. Dessa system kan vara antingen öppna eller slutna och för värmeöverföringen används vatten eller någon annan vätska, som t.ex. denaturerad etanol. Avsikten med ett öppet system är att utnyttja omgivande berg eller vattendrag för värmeöverföringen. I ett slutet system cirkulerar en värmebärare i rör och är därmed inte i kontakt med det omgivande berget eller vattendraget.

I synnerhet utvinning av djup geotermisk energi är en bransch stadd i utveckling, så de i figuren illustrerade systemen är inte de enda möjliga alternativen. I detta kapitel presenteras de vanligaste tillämpningarna.

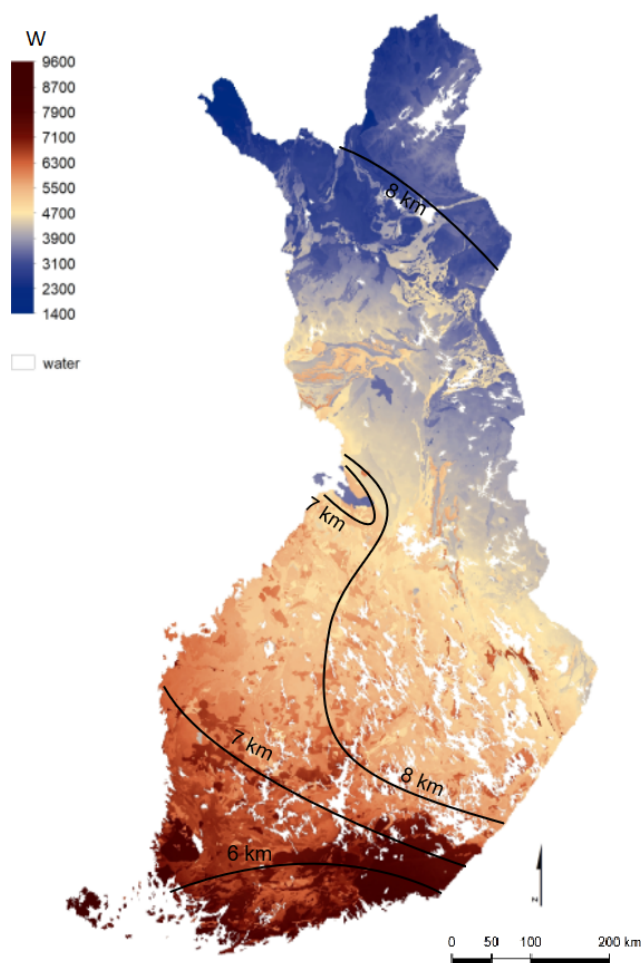


Figur 3: Möjliga tillämpningar för utvinning av geotermisk energi i finländska förhållanden.

3.1 Tillämpningar för utvinning av ytlig geotermisk energi

De vanligaste tillämpningarna för utvinning av ytlig geotermisk energi är jordvärmeslangar och bergvärmebrunnar, dvs. energibrunnar. Dessa utnyttjar solvärmen och värmen från jordens inre i markens eller berggrundens ytskikt. En jordvärmeslang är en värmeöverföringsslinga nergrävd horisontellt i markens ytskikt eller nerlagd på botten i ett vattendrag. En energibrunn är ett vertikalt borrhål i berggrunden i vilket en slang förts ner. Slangen kan vara av typen kapslat U-rör eller koaxialrör. I ett U-rör pumpas kall vätska in i rörets ena ända och den uppvärmda vätskan stiger upp i den andra ändan. I ett koaxialrör pumpas kall vätska in i brunnen längs det yttre röret och pumpas upp i det inre värmeisolerade röret. En koaxialbrunn kan vara delvis öppen, t.ex. i nedre ändan, vilket möjliggör att den även utnyttjar vattenförande strukturer i berget.

Med en energibrunn är det möjligt att producera tillräckligt med värme för ett småhus och med flera brunnar kan stora komplex värmas upp. Finlands största och Europas för tillfället tredje största energibrunnssystem är SOK:s logistikcentral i Sibbo, som består av 300 energibrunnar med ca 300 m djup.



Figur 4: Den förnybara kapaciteten i Finlands jordskorpa ner till 300 m djup, samt det borrhål som krävs för att uppnå 100 °C. Källor: GTK, <http://www.gtkdata.gtk.fi/maankamara/> och Kukkonen (2000).

Ytlig geotermisk energi kan även utnyttjas med så kallade öppna system, vilket innebär att grundvatten pumpas direkt från brunnen till en värmeväxlare. I det här fallet finns det inga separata värmeöverföringsslingor eller värmebärare i marken eller berggrunden, utan grundvattnet i sig själv är energibäraren. I det enklaste utförandet pumpas grundvatten upp från en brunn och returneras till grundvattenförekomsten via en annan brunn efter att det utnyttjats. Det har konstaterats att Finlands grundvatten lokalt sett omfattar en betydande förnybar uppvärmnings- och nedkylningsenergipotential, vilken är så gott som outnyttjad (Arola 2015).

Även i Finland har man på sista tiden börjat utnyttja geoenergi i några objekt genom att installera värmeväxlare i husens grundpålar (Lautkankare m.fl. 2017). I dessa fall består energikällan av lerskiktet i markens ytskikt.

Värmen i marken och berggrunden är en god lokal energikälla som sänker uppvärmningskostnaderna. Driften av en jordvärmepump förbrukar cirka en tredjedel av den el som förbrukas vid uppvärmning av ett elvärt hus (Pokki m.fl. 2014). I Sverige värmer energibrunnarna upp 20 % av landets småhus, vilket är mer än i något annat land i Europa (Gehlin & Andersson 2016). I Finland finns den bästa potentialen för produktion av ytlig geotermisk energi i landets södra delar (Figur 4).

3.2. Djup geotermisk energi

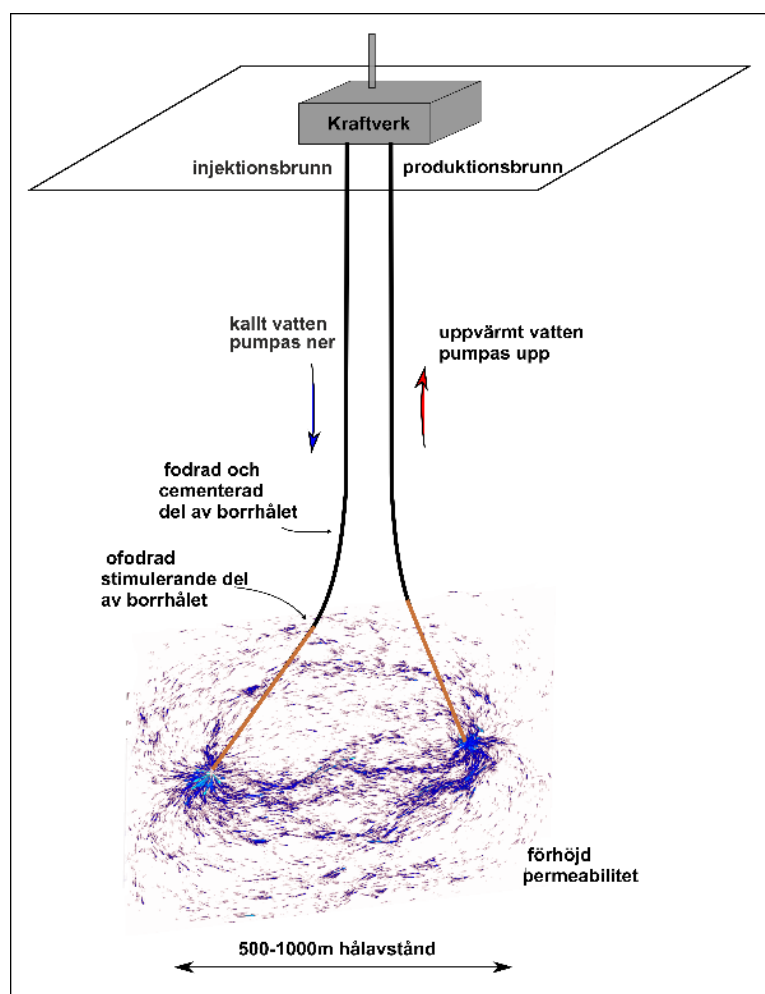
Den årstidsberoende temperaturen i markytan har ett verkningsområde ner till cirka 15 m djup. Under 15 m stiger temperaturen med djupet oberoende av årstid. Denna stabila värme i jordskorpan kallas geotermi. Den härstammar huvudsakligen från sönderfall av Jordens radioaktiva isotoper, bland annat uran, torium och kalium. Andra källor är värmen från planetens uppkomst, samt från mineralernas fasförändring vid gränsen till Jordens kärna. Vatten med en temperatur på minst 70°C kan utnyttjas för uppvärmning. För elproduktion krävs en vattentemperatur över 150°C. Vatten med en temperatur under 70°C kan utnyttjas om dess temperatur höjs tillräckligt med en värmepump. Den lokala variationen i temperaturhöjningen i jordskorpan (den geotermiska gradienten) är mycket stor. I vulkaniska områden kan hett vatten komma ända upp till markytan, medan den geotermiska gradienten i södra Finlands berggrund är cirka 2°C/100 m, och i det arkeiska östra och norra Finland som lägst 1,2°C/100 m (Kukkonen 2000). Detta innebär att en temperatur på 100°C kan nås först vid ett djup på 6–9 km beroende på område (Figur 4).

De kristallina bergarternas vattengenomsläpplighet (permeabilitet) minskar med djupet, vilket gör att den måste förstärkas på konstgjord väg. Utmaningen att förstärka permeabiliteten ökar ju djupare ner man vill hämta värme. Grunda borrhunnar är förmånligare än djupa, men produktionen måste effektiviseras med en värmepump. Det är möjligt att borra en enskild flera tusen meter djup borrhunn enligt samma funktionsprincip som för en grund brunn. Den kan vara helt eller bara delvis fodrad, och ju djupare den är desto mer värme samlar den. En brunn som är öppen nedtill kan utnyttja vattenförande

strukturer i berggrunden, vilket innebär att den kan bli förknippad med samma risker som för andra system vilka cirkulerar vatten i berggrunden (kapitel 4.1). (Doelling & Schulte 2010; Raymond m.fl. 2015.)

3.3 Förstärkt geotermisk värmeproduktion, EGS

Fritt översatt betyder Enhanced Geothermal System (EGS) ett förbättrat eller förstärkt geotermiskt system. Kraftverk av EGS-typ byggs i områden där den naturliga permeabiliteten i jordskorpan är för liten för utvinning av geotermisk energi. Permeabiliteten förbättras genom s.k. hydraulisk stimulering, dvs. genom att injicera stora mängder vatten i borrhålet. Syftet med stimuleringen är att vidga befintliga sprickor i berget. Stimuleringen är en väsentlig del vid byggandet av ett EGS-kraftverk trots att den orsakar inducerad seismicitet. Mekanismerna för hydraulisk stimulering förklaras i kapitel 4.1. Det är också möjligt att på kemisk väg effektivisera vidgandet av sprickorna i berggrunden. Vid kemisk behandling i kristallint berg löser man upp s.k. sekundärmineraler som finns i sprickorna för att förstora det utrymme där vätskan strömmar.



Figur 5: Konceptet för ett förstärkt geotermiskt energikraftverk.

Borrhålet fodras till önskat djup förutom de sista 500–1000 m av hålet, dvs. den del där vattnet ska cirkulera från injektions- till produktionsbrunnen (Figur 5). Stimuleringen görs först för ett hål. Genom att lokalisera de inducerade skalven utreder man vattenflödets riktning, dvs. de strukturer där permeabiliteten är störst. Uppsprickningsriktningen beror på berggrundens spänningstillstånd (Majer m.fl. 2007). När man vet i vilken riktning största delen av sprickorna har öppnat sig borrar det andra hålet.

För att värmeöverföringen från stenen till vattnet är möjligast jämn är det väsentligt att berggrundens spricknät är av lämplig storlek och att vattenflödet är jämnt. Ifall en eller flera större flödesvägar öppnar sig kan det leda till problem, eftersom en stor del av vattnet då flödar så snabbt till utloppshålet att det inte hinner värmas upp tillräckligt. Det är också möjligt att en del av vattnet flödar i små sprickor långt från utloppshålet och därmed blir kvar i berggrunden eftersom det inte når produktionsbrunnen.

Vattenflödet mellan borrhålen är snabbare än värmeöverföringen i det omslutande berget, vilket betyder att vattenflödet i berggrunden kyler ner berget. Kraftverket har därför en viss begränsad driftstid beroende dels på bergets temperatur och värmeegenskaper, dels på den underjordiska värmereservoarens struktur och dels på vattnets flödes hastighet. Vid drifttidens slut hinner vattnet inte längre värmas upp tillräckligt på vägen från injektions- till produktionsbrunnen.

Det finns rikligt med kraftverk av EGS-typ i världen, men de flesta har placerats i sedimentär berggrund eller nära markytan där berggrundens vattengenomsläpplighet är betydligt bättre än i en kristallin berggrund. Få av dessa finns i en med Finland jämförbar geologisk miljö. I Finlands svala berggrund måste man borra ner till över 5 km djup för att uppnå den nödvändiga temperaturen 100°C. EGS-projekt kan också genomföras med grundare borrhål (t.ex. 2–3 km) om värmepumpar används för förstärkning. I tabell 1 ges exempel på kraftverk som anlagts i kristallin berggrund och deras parametrar.

- Soultz-sous-Forêts ligger i Rhenlandets gravsänka i Frankrikes östra del. Sedimentskiktet ovanpå graniten är i genomsnitt 1,4 km tjockt. När kraftverksprojektet i Soultz startade 1987 var det Europas första EGS forskningsprojekt. För närvarande (2019) producerar kraftverket värme och el. (Evans m.fl. 2012; Feder 2018.)
- Kraftverksprojektet i Basel i södra ändan av Rhenlandets gravsänka i Schweiz avbröts 2006 till följd av en kraftig inducerad jordbävning. Jordbävningen inträffade efter att injiceringen hade avbrutits på grund av förhöjd seismicitet. Staden hade skadats svårt i en jordbävning (M 6,7) år 1356, vilket gjorde att befolkningen från första början hade en mycket låg tolerans för inducerade jordbävningar. De inducerade skalven orsakade bolaget ersättningskostnader på totalt 7 miljoner schweiziska franc. Den seismiska risken har förblivit förhöjd i årtal efter att produktionen körts ner. (Majer m.fl. 2007; Häring m.fl. 2008.)

- Kraftverket i Landau nära Soultz, är beläget i Rhenlandets gravsänka i västra Tyskland. Områdets två största jordbävningar (M 2,7 och M 2,4) inträffade år 2009 under ett underhålls-avbrott vid kraftverket. Det har också skett en betydande landhöjning i området. Kraftverket är fortfarande i drift och producerar både värme och el. (Hagag & Obermeyer 2017.)
- Cooper Basin-kraftverket var beläget i inlandet i Australiens östra del. Sedimentskiktet ovanpå granitberggrunden är 3,6 km tjockt, så det räckte med att borra endast 700 m i granit. Eftersom kraftverket låg långt från bebyggelse gav de inducerade jordskalven, orsakade av spräckningen, inte upphov till lika stor oro som i det tätbefolkade Europa. Kraftverket stängdes år 2016 p.g.a. att den inte uppnådde det önskade 50 MW produktionen. (Asanuma m.fl. 2004; Hogarth & Holl 2017; Feder 2018.)
- I Sydkorea började man 2012 bygga ett kraftverk i Pohang. Den största inducerade jordbävningen under stimuleringarna 2016–17 hade en magnitud på M 3,2. Två månader efter stimuleringen i november 2017 inträffade en jordbävning med magnituden M 5,4. I jordbävningen skadades 135 personer, konstruktionsskador observerades hos 57 000 objekt, och de totala kostnaderna steg till över 300 miljoner USA-dollar. I en nyligen publicerad utredning, gjord på uppmaning av Sydkoreas regering, har orsakssambandet mellan EGS-verksamheten och jordbävningen bekräftats. Därmed är jordbävningen den hittills största och mest förödande händelse ett EGS-projekt inducerat. (Grigoli m.fl. 2018; Kim m.fl. 2018; Korean Government Commission 2019.)

Tabell 1: Exempel på EGS-kraftverk ute i världen och uppgifter om deras nyckelparametrar – borrhjup, avstånd mellan injektions- och produktionsbrunn vid hålets botten, måltemperatur, total pumpad mängd och maximalt flöde under stimuleringen, värmens produktionseffekt samt magnituden för det största inducerade skalvet (M_{max}).

Kraftverk status	Djup (km), hålavstånd (m)	Temperatur (°C)	Pumpad mängd (m ³)	Flöde max. (l/s)	Producerad effekt	M _{max}
Soultz-sous- Forêts i drift	5 650	200	39 800	90	30 MW värme 3 MWe el	2,9 efter stimulering
Basel avbruten	5	190	11 500	55		3,4 under stimulering
Landau i drift	3 1 500	160		80	3 MW värme 3,8 MWe el	2,7 under drifts- avbrott
Cooper Basin stängd	4,3 700	260	2 500	25	1 MW värme	3,7 under stimulering
Pohang avbruten	4,3 600	140	12 800	48		5,4 efter stimulering
Otnäs under byggnad	6,4	100	18 160	30		1,8 under stimulering

3.4. Geotermiska projekt i Finland (2019)

I Finland har det hittills ansökts om tillstånd för grundandet av två geotermiska värmeanläggningar. Den ena är beläget i Otnäs i Esbo (två cirka 7 km djupa hål) och den andra i Tammerfors (ett cirka 8 km djupt hål). I båda fallen är det frågan om en tillståndsansökan enligt MBL från stadens byggnadstillsyn. I Esbo har ett utvidgat åtgärdstillstånd beviljats den 20.8.2015 och i Tammerfors ett bygglov den 16.9.2015.

I Esbo har man jämställt åtgärden med borrning av en jordvärmebrunn enligt 62 § i markanvändnings- och byggförordningen (895/1999, MBF) – en paragraf som numera är upphävd. Nuförtiden finns det bestämmelser om borrning av värmebrunn för utnyttjande av jordvärme i 126a § 12 punkten i MBL, där borrningen betraktas som en åtgärd som kräver åtgärdstillstånd, dvs. att man för anläggandet i stället för bygglov kan ansöka om åtgärdstillstånd. För värmebrunnarnas del finns en precisering enligt vilken åtgärdstillstånd inte behövs om åtgärden baserar sig på en plan med rättsverkningar. Dessutom får kommunen i byggnadsordningen föreskriva att det i kommunen eller en del av kommunen inte behövs åtgärdstillstånd för en värmebrunn om åtgärden kan betraktas som ringa. I MBL tas inte ställning till brunnarnas djup.

Både i Esbo och Tammerfors har man begärt utlåtande gällande tillståndsansökningarna av NTM-centralen (Nyland och Birkaland). Dessutom har man i Esbo begärt ett ställningstagande av stadens miljöcentral. NTM-centralen i Birkaland har i sitt utlåtande konstaterat att utifrån de givna uppgifterna kräver djupborrningen inga tillstånd enligt miljöskyddslagen eller vattenlagen (587/2011, VL), och inte heller tillämpning av förfarandet med miljökonsekvensbedömning enligt MKB-lagen. Centralen i Birkaland konstaterar dock att verksamheten på basis av 27 § 3 punkten i MSL och 17 § 1 mom. i lagen angående vissa grannelagsförhållanden (26/1920) kan komma att kräva miljötillstånd, bl.a. för buller- eller dammolägenheter som grannar kan bli utsatta för. I både Esbos och Tammerfors' tillstånd har grannarna hörts i enlighet med 133 § i MBL. NTM-centralen i Birkaland fäste i sitt utlåtande även uppmärksamhet vid placeringen av objektet med avseende på grundvattenområden, och konstaterade att projektet inte placeras på ett sådant.

Erfarenheterna från den första stimuleringen vid kraftverket i Otnäs i Esbo behandlas i kapitel 4.4.2.

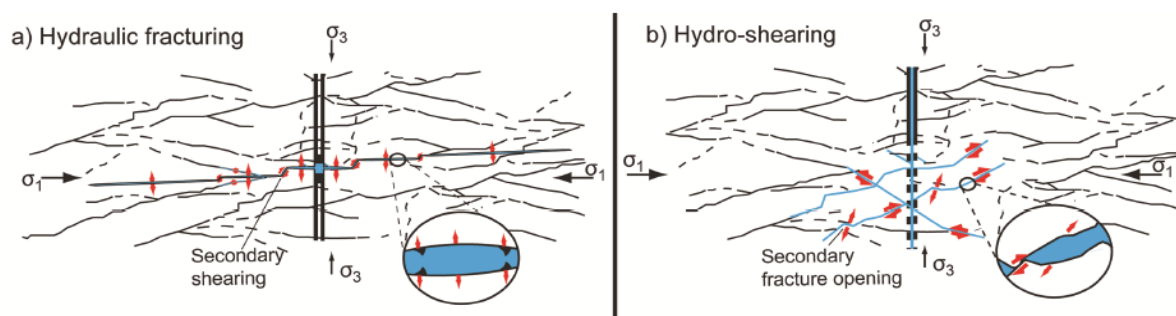
4. Seismisk riskhantering vid djupa geotermiska kraftverk

Berggrundens spänningstillstånd förändras när vatten injiceras i den, vilket kan ge upphov till jordbävningar. Jordbävningar orsakade av mänsklig aktivitet kallas inducerade jordbävningar. Dessa kan utöver geotermisk verksamhet orsakas av olje- och gasproduktion, underjordisk gruvdrift, vattenmassor i närheten av stora dammbassänger och inpumpning av avloppsvatten. Man strävar till att hantera risken för inducerad seismicitet genom kartläggning av inverkan av faktorer, samt genom övervakning av verksamhet som inducerar seismisk aktivitet. Detta kapitel ger bakgrundsinformation för rekommendationerna gällande tillståndsansökningar för geotermiska energianläggningar (kapitel 5). I kapitlet beskrivs mekanismerna för inducerade jordbävningar, kartläggningen av jordrörelserna i området, definitionen för den seismiska hasarden och risken, samt principerna för den seismiska övervakningen.

4.1 Inducerad seismicitet

En inducerad jordbävning, dvs. en jordbävning orsakad av mänsklig aktivitet, skiljer sig inte med tanke på uppkomstsättet nämnvärt från en naturlig. En naturlig jordbävning, dvs. en tektonisk jordbävning, uppkommer då spänningen i någon punkt i jordskorpan överskrider bergets hållfasthet och spänningsenergin utlöser en markrörelse. Svaghetspunkter i kristallin berggrund utgörs av en mångfald av sprickor och förkastningar av olika storlek. En del av förkastningarna befinner sig i ett kritiskt spänningstillstånd, vilket betyder att det för att utlösa en jordbävning bara behövs en liten ökning av spänningen (Zoback m.fl. 2002; Gischig & Preisig 2015). Naturliga orsaker till att spänningen ökar är kontinentalplattornas rörelse, samt t.ex. landhöjning orsakad av inlandsisen. Även om berggrunden ursprungligen inte befann sig i ett kritiskt spänningstillstånd kan en mänsklig aktivitet orsaka en så stor spänningsförändring att det sker en förkastning, vilket utlöser en inducerad jordbävning.

I EGS-projekt injicerar man vatten med högt tryck i berget för att öka bergets naturliga permeabilitet. Detta spräcker berget på två olika sätt. Det första sättet är att genom hydraulisk spräckning (eng. hydraulic fracturing; Figur 6a) öka trycket tills det överstiger den minsta huvudspänningen (σ_3). Då öppnas s.k. drag- eller extensionssprickor i berget. Detta är en isärdragande rörelse vinkelrätt mot sprick-



Figur 6: Mekanismerna för den hydrauliska spräckningen: a. hydraulisk spräckning, dragspricka, b. hydrauliskt inducerad skjuvrörelse, rörelse i sprickornas riktning. σ_1 och σ_3 är bergets största och minsta huvudspänningskomponent. Källa: Gischig & Preisig (2015, figur 1).

väggarna och mot den minsta huvudspänningen (σ_3), vilken därefter fortskrider i sprickans riktning. Till det injicerade vattnet kan tillsättas sandkorn eller något motsvarande syntetiskt ämne för att förhindra extensionssprickorna från att sluta sig efter avslutad inmatning. Även i intakt berg kan det uppkomma sprickor. Sprickor orsakade av extensionsspänning växer långsamt och blir högst några hundra meter långa. Det har bedömts att denna händelseserie frigör så lite seismisk energi att det inte inverkar på områdets seismiska hasard. (Foxall m.fl. 2015.)

Det andra sättet är att hydrauliskt åstadkomma en skjuvning (eng. hydro-shearing; Figur 6b). Det här förutsätter att trycket överstiger friktionen i bergets brottyta, varvid brottytans motsatta sidor rör sig i förhållande till varandra. Förändringen är permanent p.g.a. att ojämnheter i ytorna förhindrar sprickorna från att sluta sig (Kraft m.fl. 2009; Gischig & Preisig 2015). Eftersom hydraulisk spräckning leder till en förändring av det totala spänningstillståndet kan en sådan här skjuvrörelse (eng. shear slip) i brottytor ske när extensionssprickor bildas. Det är svårare att kontrollera skjuvrörelser med hjälp av vatteninmatningsparametrar. Skjuvrörelser anses orsaka de största inducerade skalven (Gischig & Preisig 2015).

I ett geotermiskt kraftverks olika driftsfaser är de huvudsakliga mekanismerna bakom inducerad seismicitet:

- **Tryckförändringar:** Porer i berggrunden är fyllda med vatten, vilket skapar ett visst tryck i dem. Spänningstillståndet i berget förändras när vätska injiceras och sprickor kan öppna sig i enlighet med figur 6. På motsvarande sätt minskar trycket och den seismiska aktiviteten när mer vätska pumpas upp ur berggrunden än pumpas ner. I mycket porös berggrund kan en minskning av portrycket medföra att marken sätter sig. Detta fenomen påträffas endast vid kraftverk där vattnet tas nära markytan utan att returneras.
- **Jordskalvens interaktioner:** I en jordbävning frigjort energi kan utlösa nya jordbävningar. Detta sker i synnerhet i närheten av svaghetszoner i ett kritiskt spänningstillstånd, där även en liten förändring av spänningstillståndet kan leda till markrörelser.
- **Kemiska förändringar:** Olika mineraler reagerar på olika sätt med det injicerade vattnet. Det här leder till att det i berget sker kemiska förändringar, formation av lera, mineraler kristalliseras, och bindningar i sprickor försvagas. Allt detta bidrar till en förändring av sprickytornas friktionskoefficient. Dessa förändringar sker i befintliga sprickor, dvs. i berggrundens svaghetspunkter. Inducerade jordbävningar inträffar då svaghetspunkterna ger vika.
- **Temperaturförändringar:** I produktionsfasen kyls berget småningom ner och nya sprickor kan bildas när berget kontraherar. Vattnet kan sprida sig i de nya sprickorna, dvs. permeabiliteten ökar, men samtidigt förändras både flödes hastigheten och trycket, och dessutom kan seismicitet inträffa längre bort från hålet. Temperaturutjämningen tar minst lika lång tid som det tog verksamhet att förändra bergets temperatur. I borrhållningsfasen värms berggrunden

upp och värmeutvidgningen ökar spänningstillståndet. Tryckförändringen orsakad av temperaturförhöjningen är dock så liten att den inte i vanliga fall inducerar seismicitet.

Utgående från områdets geologi och kraftverkets driftsparametrar kan effekterna av vatteninmatningen uppskattas grovt på förhand. Det finns begränsat med observationsdata gällande inducerad seismicitet. Många antaganden baserar sig därför på teoretiska modeller och kan förändras till följd av mer forskning.

- **Berggrundens bergart:** Kristallint berg tenderar att vara känsligare för jordbävningar än sedimentärt berg (Evans m.fl. 2012). Även med tanke på borrningen är information om bergarterna och deras egenskaper viktiga, och den fås från det under borrningen tillvaratagna stenmaterialet.
- **Områdets förkastningar:** Sannolikheten för inducerade jordbävningar ökar markant vid injicering av vatten i närheten av seismiskt aktiva förkastningar (Wiemer m.fl. 2017). En allmän regel är att man i EGS-projekt bör undvika vidsträckta seismiskt aktiva förkastningszoner. Huruvida förkastningar aktiveras beror på deras djupstruktur och orientering i förhållande till spänningsfältet i området. Information om förkastningarnas djupstruktur och rörelsepotential fås bl.a. genom spänningstillstånds- och tyngdkraftsmätningar, samt genom att jämföra förkastningarnas orientering och mekaniska egenskaper med det lokala spänningstillståndet.
- **Förkastningsområdets storlek:** Styrkan på en jordbävning beror på hur stor del av förkastningen som aktiveras på en gång och hur stor förskjutningen är. Mer vidsträckta förkastningar har en större potential för en stor jordbävning. En stor jordbävning kan orsaka mer skador eftersom förskjutningen är större, varar längre och frigör mer energi. Information om berggrundens enheter och förkastningarnas utbredning fås genom geofysikaliska modeller och undersökningar.
- **Mängden injicerad vätska:** Ju större volym av berggrunden som blir utsatt för förändringar av spänningstillståndet, desto mer inducerade jordbävningar är att vänta (kapitel 4.3.2).
- **Portryck:** I berggrunden är portrycket ofta närapå kritiskt, så ett skalv kan utlösas av även en liten förändring. Ju snabbare förändringen är, desto sannolikare är seismiska händelser (Majer m.fl. 2007).
- **Värmereservoarens djup:** Förändringar i spänningstillståndet djupt i berggrunden anses utgående från jordskorpan hållfasthetsprofil inducera större jordbävningar (Gishig & Wiemer 2013). Jordskorpan spänningstillstånd ökar ända ner till cirka 10–15 km djup. Därför kan en förskjutning i en djup förkastning frigöra mer energi än en grund förkastning. Detta djupberoende grundar sig på en teoretisk modell, men det finns lite empiriska bevis för det (Wiemer m.fl. 2017).
- **Bakgrundsseismicitet:** Det har framförts att risken för en stor inducerad jordbävning är liten i områden med låg bakgrundsseismicitet (Evans m.fl. 2012). Enligt mer omfattande studier finns

det ingen korrelation mellan magnituden på inducerade eller naturliga jordbävningar och områdets bakgrundsseismicitet (Wiemer m.fl. 2015). Det finns skäl att utreda bakgrundsseismiciteten i anknytning till kartläggningen av den naturliga seismiska hasarden (kapitel 4.3.1).

Inducerad seismicitet uppträder huvudsakligen inom en radie på cirka 500 m från det trycksatta hålet. Injicering av vatten har även utlöst jordbävningar längre bort från produktionsbrunnen (Goebel & Brodsky 2018). Det är svårt att bevisa att dessa skalv beror på mänsklig aktivitet, eftersom de i allmänhet sker i förkastningar som även annars lätt aktiveras till följd av förändringar i det lokala spänningsfältet.

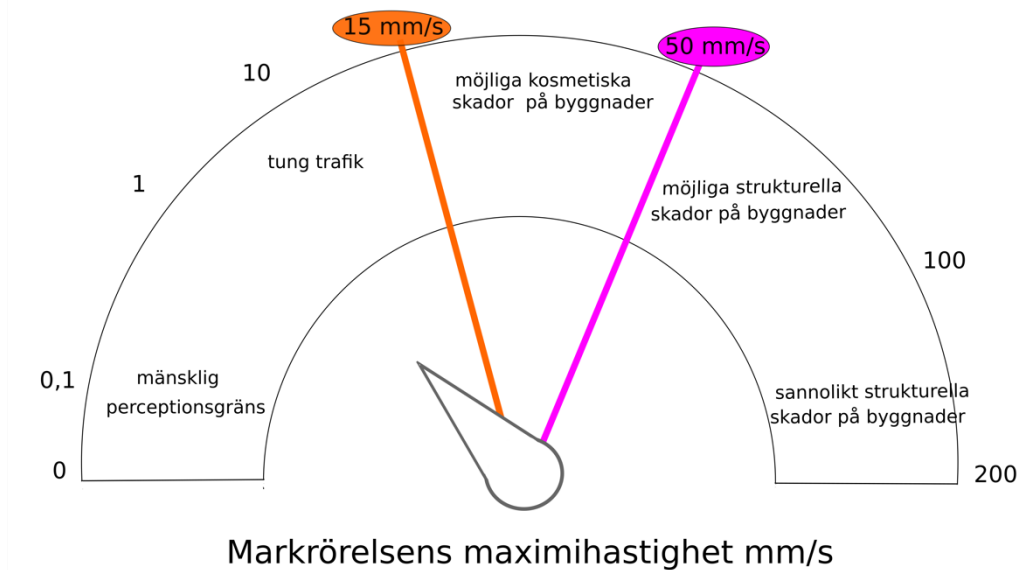
I verksamhet som inducerar jordbävningar är det viktigt att objektivt och öppet skilja inducerade jordbävningar från annan seismicitet (sprängningar, naturliga jordbävningar). Allmänheten förhåller sig olika till inducerade än till naturliga jordbävningar. Till den förra är toleransen lägre. Även en svag seismisk observation kan få människor att söka skadestånd för byggnadsskador – oavsett om skadorna orsakats av den observerade händelsen eller inte. Nuförtiden finns det effektiva metoder, bl.a. baserade på spektralanalys, för att skilja mellan sprängningar och jordbävningar (Kortström m.fl. 2016). Med hjälp av s.k. lösningar för förkastningsplanet eller moment tensor kan man skilja mellan inducerade och naturliga jordbävningar. Utgående från lösningarna erhålls en uppskattning av förkastningsrörelsen i skalvkällan, samt av det spänningsfält skalvet orsakar. Den noggrannaste bilden av källmekanismen för en jordbävning fås av lösningen för moment tensor, p.g.a. att den utöver förkastningens rörelseriktningar bl.a. även ger en modell av den spatiala förändringen vid jordbävningens uppkomst (Foulger & Julian 2015). Båda metoderna kräver att det seismiska observationsnätet kring kraftverket är tillräckligt tätt (kapitel 4.4).

Miljökonsekvenserna av en jordbävning beror på dess styrka, djup och läge. En jordbävning nära markytan är mer förödande än en djup jordbävning av samma magnitud. En kraftig jordbävning mitt i öknen kan gå obemärkt förbi, medan en svagare jordbävning i ett tätbebyggt område kan vara förödande. I bebodda områden kan människor observera mycket svaga jordbävningar och uppleva dem som störande. Det rekommenderas att man vid utvärderingen av riskerna förknippade med inducerad seismicitet utöver magnituden även använder markhastighets- eller accelerationsvärden (PGV/PGA, kapitel 4.2). Tanken baserar sig på att PGV och PGA beskriver markrörelsen i mätpunkten och magnituden i skalvkällan. Vilken inverkan en jordbävning av en viss styrka har beror dels på händelsens djup och avstånd, samt dels på områdets geologi. Vibrationståligheten för många konstruktioner och apparater anges uttryckligen med hastighets- eller accelerationsvärden. Före varje stimuleringsprojekt utförs en seismisk riskbedömning, vilken innehåller en prognosmodell för de största markrörelserna. Prognosmodellerna kan uppdateras under och efter injicering av vatten genom att samla in data om markrörelserna orsakade av inducerad seismicitet, samt om dess konsekvenser. (Bommer 2017.)

För att minimera de negativa effekterna av seismiciteten lönar det sig att optimera placeringen av förstärkta geotermiska kraftverk, eftersom de oundvikligen orsakar seismicitet. Värmeförlusten kan minskas genom att placera kraftverket tillräckligt nära uppvärmningsobjektet. Ett säkerhetsavstånd bör fastställas mellan kraftverket och bebyggda områden. Detta avstånd bör bestämmas från fall till fall, eftersom det beror på förkastningarnas utbredning och kontinuitet. Till följd av bergets mekaniska egenskaper sker de största inducerade skalven i huvudsak i ytterkanterna av det stimulerade området (den s.k. Kaiser-effekten). Risken för skalv kvarstår tills den uppbyggda spänningen avklingat, vilket kan ta flera år (Baisch & Harjes 2003, Zang m.fl. 2014).

4.2 Tillåtna markrörelser

Vid utvärdering av hur markrörelser orsakade av jordbävningar och sprängningar inverkar på människor och konstruktioner används i allmänhet antingen den maximala markaccelerationen (PGA) eller den maximala markhastigheten (PGV). PGV-tröskelvärdena är vanligare för byggnadsarbeten med tillhörande planering. Den maximala markhastighetens möjliga inverkan på människor och byggnader är illustrerad i figur 7. Människans varseblivningströskel går vid 0,05 mm/s (RIL 253-2010), och enligt Bommer (2017) är 15 mm/s det minsta PGV-värdet som kan orsaka smärre skador på svaga



Figur 7: Exempel på hur markrörelser inverkar på människor och konstruktioner. Modifierad från Bommer (2017) och RIL 253-2010.

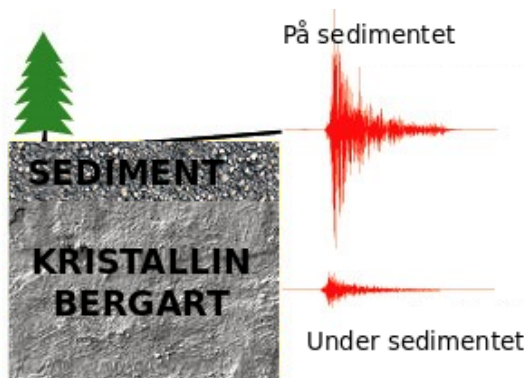
konstruktioner (gränsvärdena är riktgivande). I tabell 2 listas PGV-tröskelvärden för sprängningsarbeten i olika jordarter enligt anvisningar publicerade av Finlands Byggnadsingenjörsförbund r.f. (RIL) (RIL 253-2010). Värdena kan inte direkt tillämpas vid övervakning av markrörelser orsakade av jordbävningar, eftersom tabellen gäller sprängningsarbete för brytning av sten. Sprängningar görs enligt en viss tidsplan, medan de inducerade skalven kan inträffa vid vilken tidpunkt som helst. Seismiska vågor orsakade av sprängningar fortplantar sig i jordskorpan fragmenterade ytskikt där den seismiska energin snabbt minskar med avståndet. Jordbävningsvågor bildas djupare i jordskorpan, och eftersom

de främst fortplantar sig i hårt kristallint berg bedarrar de långsammare. Vad gäller energi- och frekvensinnehåll finns det också skillnader mellan sprängningar och jordbävningar. Från en sprängningskälla sprids seismisk energi jämnt i varje riktning, medan strålningsmönstret för en jordbävning beror på bl.a. förkastningens geometri och rörelsens riktning på förkastningsytan. Dessutom har jordbävningar ett bredare frekvensspektrum än sprängningar (Kortström m.fl. 2016).

Tabell 2: Tröskelvärden för maximal markhastighet (PGV, mm/s) för olika konstruktionsklass och jordarter, samt berggrunden. Värdena gäller 1 m och 2000 m (inom parentes) från sprängningsplatsen. Anvisningarna är publicerade av Finlands Byggnadsingenjörsförbund r.f. (RIL 253-2010 Rakentamisen aiheuttamat värinät). Tabellens värden kan inte direkt tillämpas på djupborrning.

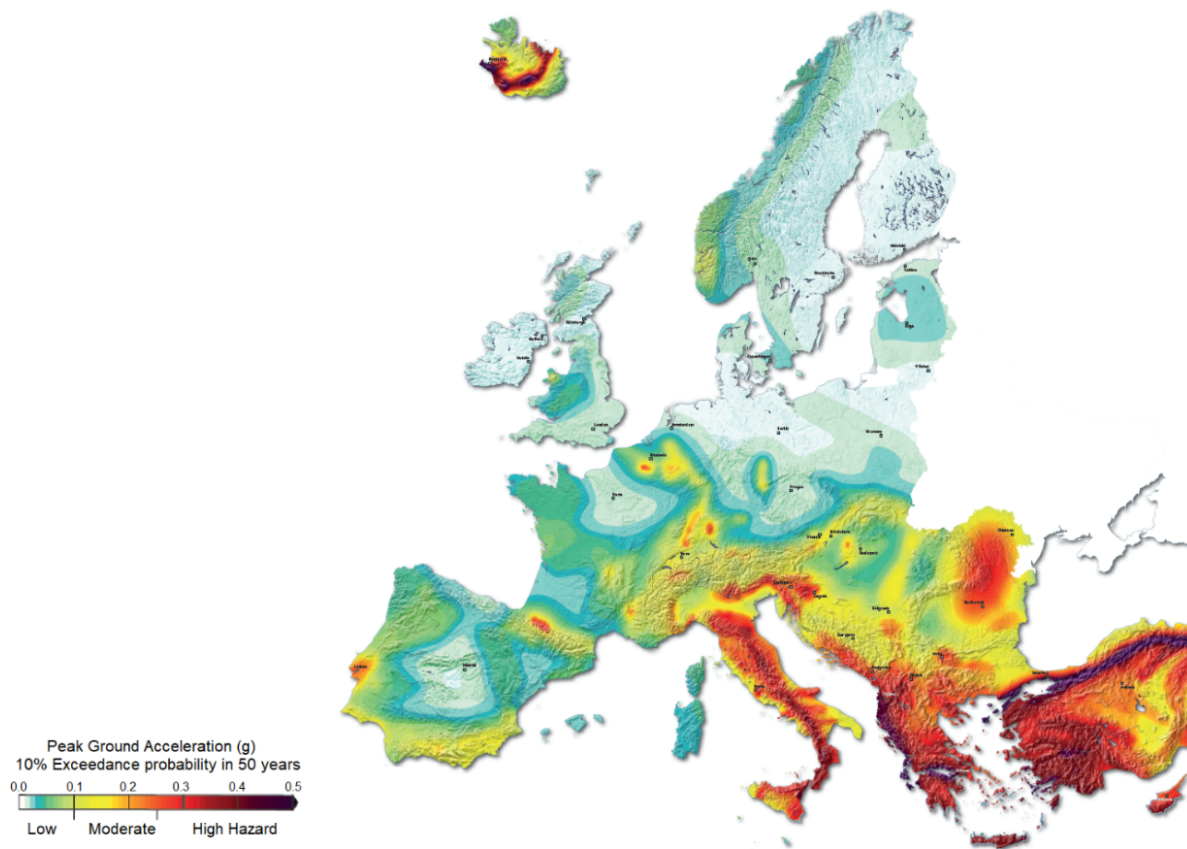
Konstruktionsklass:	Jordart:			Fast berg
	Mjuk lera	Silt, sand	Morän, grus	
Tunga stålbetong- och stålkonstruktioner, broar, bryggor osv.	15,75 (5,25)	31,5 (8,75)	61,25 (12,25)	245,00 (15,75)
Stål- och betongkonstruktioner, industriella	11,25 (3,75)	22,5 (6,25)	43,75 (8,75)	175,00 (11,25)
Stål- och betongkonstruktioner, bostäder	9,00 (3,00)	18 (5,00)	35 (7,00)	140,00 (9,00)
Tegelkonstruktioner och motsvarande	7,65 (2,55)	15,3 (4,25)	29,75 (5,95)	119,00 (7,65)
Byggnader av lätt konstruktion och vibrationskänsliga byggnader	4,95 (1,65)	9,9 (2,75)	19,25 (3,85)	77,00 (4,95)

Vid kartläggningen av marken i kraftverkets närområde klassificeras tjocka, mjuka förekomster av lös jord (bl.a. lermark) som eventuellt vibrationskänsliga områden. När seismiska vågor orsakade av en jordbävning rör sig från kristallint berg till ett mjukt jordlager fortplantar de sig långsammare medan de samtidigt förstärks (Figur 8). Fenomenet kallas amplifikation. Markytans form kan ytterligare förstärka vågen. T.ex. sker detta i en sedimentbassäng där en seismisk våg mångdubblas då den reflekteras flera gånger från formationens sidor och yta.



Figur 8: Amplifikation: ett mjukt ytskikt förstärker markrörelsen. Modifierad från <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-131-02/fs-131-02-p4.html>.

Kartor över seismisk hasard baserar sig ofta på PGA-värden, vilka anges i procent av tyngdkrafts-accelerationen (g) ($= 9,81 \text{ m/s}^2$). Enligt EU-standarder (EN 1988:1 2004) behöver jordbävningar i områden där PGA har uppskattats vara mindre än $0,04 \text{ g}$ ($= 0,39 \text{ m/s}^2$) inte beaktas. I Finland är PGA-värdena cirka $0,02\text{--}0,03\text{g}$ (Figur 9), vilket gör att jordbävningsslaster inte beaktas vid dimensionering av vanliga byggnader. För känsliga mätarrangemang har det fastställts högsta tillåtna vibrationshastigheter, och för dem används i allmänhet vibrationsdämpare dimensionerade enligt omgivningen. Sker det förändringar i seismiciteten kan dimensioneringen och dämparna vara otillräckliga. I sådana fall finns det risk för att både känslig apparatur och vanliga konstruktioner skadas.



Figur 9: Den naturliga seismiska hasarden i Europa uttryckt med PGA-värden. Färgskalan motsvarar ett PGA-värde (g) som överskrider i genomsnitt en gång på 500 år. Finland hör till områden med liten hasard. Källa: Giardini m.fl. (2013).

4.3 Bestämning av seismisk hasard och seismisk riskbedömning

Med seismisk hasard, dvs. hot, avses sannolikheten för att en given jordbävningssmagnitud, eller någon annan parameter för markrörelser, överskrider i ett visst område under en viss tidsperiod. Den seismiska hasarden definieras statistiskt (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA) och/eller utifrån områdets källparametrar (Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA). Bestämning av hasarden gällande driften av geotermiska kraftverk består av två delar – den naturliga seismiska hasarden i området ligger till grund för hasarden förknippad med den av vatteninjicering inducerade seismiska aktiviteten.

Bestämningen av hasarden består av att områdets bakgrundsseismicitet, förkastningar och regional geologi kartläggs. Dessutom görs en prognostiserande modell för markrörelserna, samt en bedömning gällande förkastningarnas aktivitet. Även förekomstfrekvensen för jordbävningar vid olika magnituder samt den maximala magnituden bedöms. Kraftverkets driftsparametrar (bl.a. mängden injicerat vatten och trycket) är grunden vid bestämningen av hasarden gällande inducerad seismicitet. Bedömningen är svår eftersom erfarenheterna tills vidare är begränsade (Majer m.fl. 2012).

De skador och kostnader, vilka eventuellt kan orsakas i händelseområdet av en jordbävning, bedöms i en seismisk riskanalys. Riskanalysen baserar sig på hasardanalysen. I riskanalysen beaktas även markens förstärkande inverkan, av jordbävningar utsatta byggnader och invånare, samt jordbävningars sekundära hasarder, såsom jordskred och tsunamier (Borman 2002, Wiemer 2017). Exempel på tillvägagångssätt och metoder lämpliga för hasard- och riskberäkningar gällande inducerad seismicitet finns bl.a. i publikationerna Bommer m.fl. (2015) och Walters (2015). Olika riskanalysverktyg har utvecklats för bestämningen av seismisk risk, t.ex. GRID (Trutnevyte & Wiemer 2017) och SELINA (SELINA 2018).

4.3.1 Kartläggning av bakgrundsseismiciteten och naturlig seismisk hasard

För att kunna bestämma nivån på bakgrundsseismiciteten krävs en möjligast heltäckande jordbävningskatalog över den seismiska historien i området. Katalogens nyckelparametrar är tidpunkten och läget för jordbävningen samt dess djup och styrka (intensitet, magnitud). Katalogen förenhetligas så att det går att jämföra styrkorna för jordbävningar från olika tider med varandra. De statistiska metoder som används i hasardanalysen grundar sig på antagandet att jordbävningarna är oberoende av varandra. Därför måste katalogen rensas från jordbävningar orsakade av mänsklig aktivitet, samt för- och efterskalv.

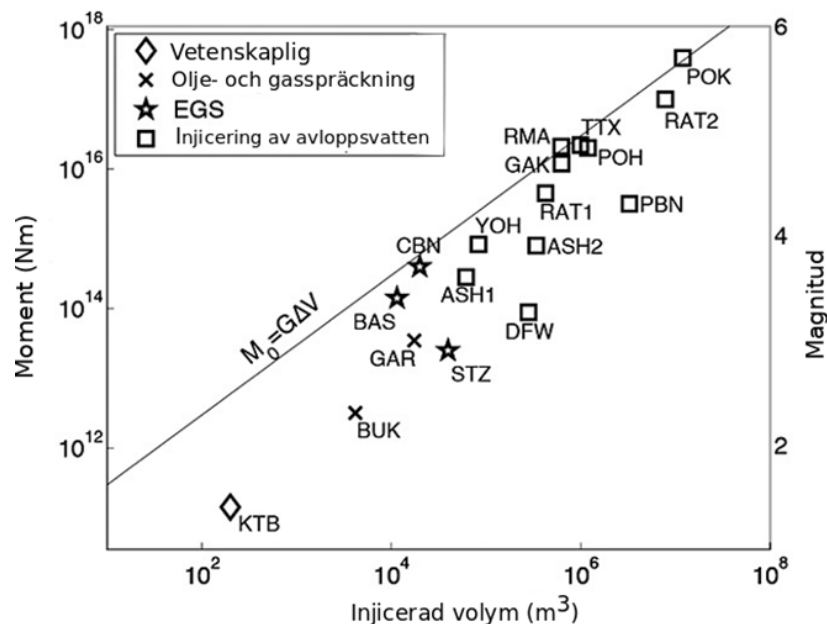
Händelsernas förekomstfrekvens och maximala magnituder beräknas utgående från jordbävningsmaterialet, samt också sannolikheten för att en viss magnitud överskrider i området inom en viss tidsperiod (Kijko & Sellevoll 1989, 1992; Kijko 2004; Kijko & Singh 2011; Kaisko 2018). Utvärderingen av den maximala magnituden i ett område kan också vara deterministisk, varvid den bestäms utifrån de empiriska förhållandena mellan förkastningens längd, areal, förskjutningens maximi- och medelvärde.

En ny ekvation för prognostisering av markrörelse i Fennoskandia skapades i samband med EVOGY-projektet, som avslutades i januari 2019. Den jämfördes med äldre ekvationer (Fülöp m.fl. 2019). Ekvationen kan utnyttjas vid utvecklandet av en karta över den seismiska hasarden i Finland.

4.3.2 Hasard gällande inducerad seismicitet

Det har konstaterats, att det finns en korrelation mellan vatteninjiceringen och den maximala inducerade magnituden. Därför strävar man till att genom olika modeller prognostisera den maximala magnituden.

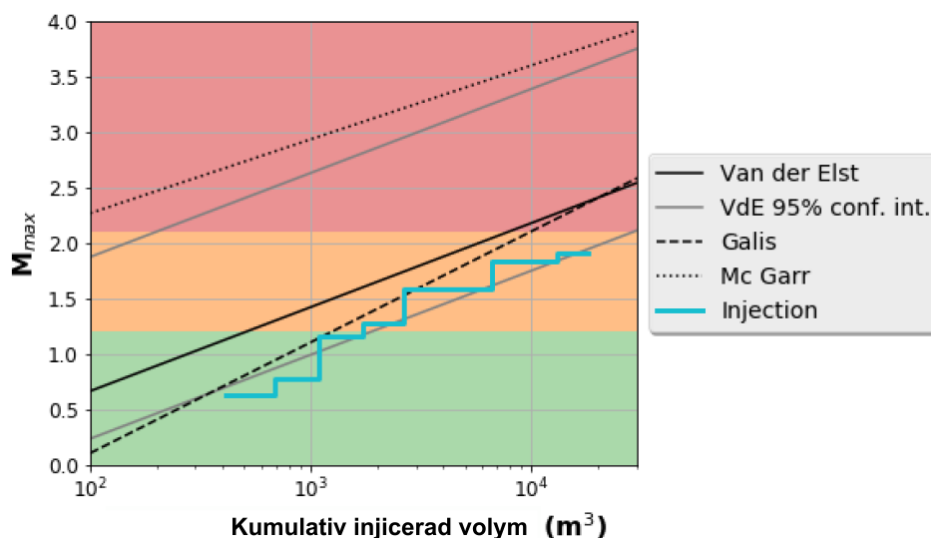
Utgångsparametrarna består av den injicerade vattenvolymen och värmereservoarens egenskaper, såsom storlek och hydraulisk diffusivitet (dvs. hur snabbt vatten rör sig genom en porös rymd). Modellerna utnyttjar även statistiska parametrar härledda från bakgrundsseismiciteten. Figur 10 illustrerar den enklaste modellen av McGarrins (2014). Enligt denna modell beror jordbävningsmagnituden både på den injicerade vattenvolymen och egenskaperna hos berget i värmereservoaren. Figuren visar att ju mer vatten injiceras, desto större händelser har skett i objekten. (Shapiro m.fl. 2007, 2010; McGarr 2014; Van der Elst m.fl. 2016)



Figur 10: Korrelationen mellan injicerad vattenmängd och jordbävningsmomentet/magnituden i olika objekt. Linjen representerar en teoretisk övre gräns för momentet.
Källa: McGarr (2014, figur 2).

I figur 11 jämförs den maximala magnitud som inducerats av vatteninjiceringen i Otnäs, med de maximala magnitudvärden som prognostiserats med tre olika modeller (McGarr 2014; Van der Elst m.fl. 2016; Galis m.fl. 2017). I Otnäsfallet prognostiserade alla modeller en för stor maximal magnitud utifrån injicerad mängd (St1 2018b; Saarno 2018). Å andra sidan överstiger magnituden för jordbävningen i Pohang (se Tabell 1) klart den teoretiska övre gränsen i figur 10.

Prognoserna är bara riktgivande, eftersom ingen av de ovannämnda modellerna beaktar alla nödvändiga parametrar. Utgående från de fysikaliska och statistiska metoderna lämpligast för området görs en bedömning angående den inducerade seismiska hasarden. Dessa modeller uppdateras under driften.



Figur 11: Förhållandet mellan injicerad vattenvolym och maximal magnitud i Otnäs (blå linje) jämfört med tre olika prognosmodeller: McGarr (2014), Van der Elst (2016) & Galis (2017). Den grå linjen visar 95 % konfidensintervallen i Van der Elsts modell. Källa: St1, (2018b).

4.4 Det seismiska övervakningssystemet

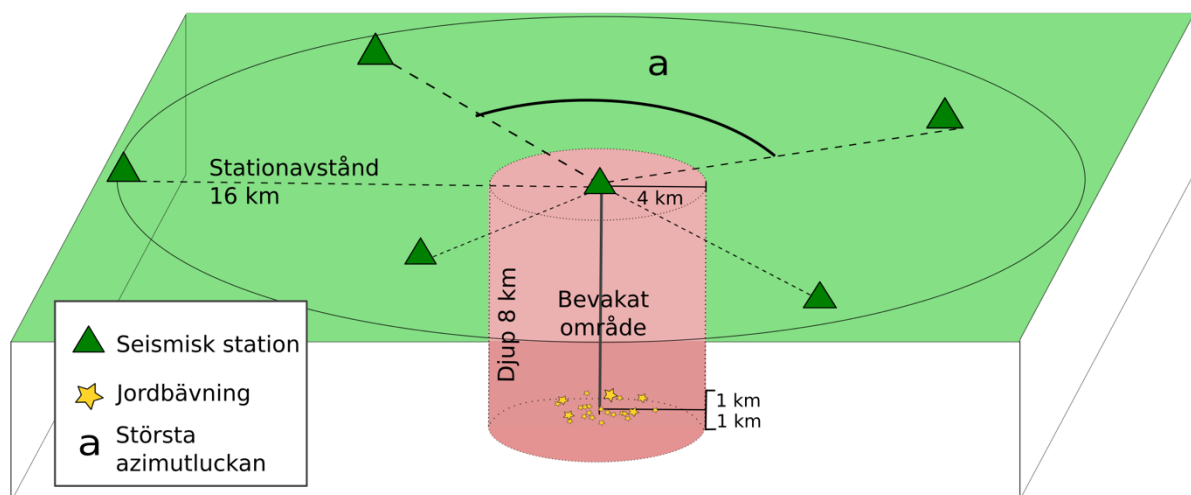
Syftet med seismisk övervakning vid ett värmekraftverk är att registrera och lokalisera källan till eventuella seismiska observationer och skador i närheten av anläggningen. Andra syften är att skilja inducerade jordbävningar från andra händelser, samt att övervaka utvecklingen av den seismiska nivån. Dessutom övervakas en eventuell spridning av seismiciteten från värmekraftverkets driftområde till omgivande berggrund (Majer m.fl. 2007; Ungemach & Antics 2015.). För övervakningen av inducerad seismicitet används ett tätt lokalt stationsnät och ett till detta kopplat i realtid fungerande analysystem. Verksamhetsutövaren ansvarar för att bygga upp det seismiska övervakningssystemet.

Registreringen av seismiska händelser sker med instrument som mäter markrörelsen i tre mot varandra vinkelräta riktningar (t.ex. vertikalt, öst-väst, nord-syd). Tidsserier för markrörelsens acceleration mäts med accelerometrar, och lämpar sig bäst för övervakning av markrörelser. Tidsserier för markrörelsens hastighet fås av seismometrar och geofoner och används i allmänhet för identifiering, lokalisering och storleksbestämning av händelser. Det seismiska övervakningsnätet för ett kraftverksområde bör installeras i god tid innan djupborrningen inleds, eftersom testningen av stationernas funktion och klarläggning av nivån på bakgrundsseismiciteten kräver en kontrollperiod på 1–6 månader. Områdets bakgrundsseismicitet utgör ett jämförelseobjekt för de seismiska händelser som inträffar under åtgärderna.

Radien för det övervakade området bör vara minst två gånger så stort som bergvärmekraftverkets verkningsområde, eller i enskilda fall ännu större. Verkningsområdet bör uppskattas i förhandsutredningarna. Det har konstaterats att injicering av vatten i djupa borrhål i kristallin berggrund inducerar seismicitet i horisontalplanet på 0,5–2 km avstånd från hålet och på cirka ± 1 km djup från den

nivå där vattnet injiceras. Området som bör övervakas sträcker sig således minst 4 km från kraftverket och till ett djup på minst 1 km under vatteninmatningsnivån. (Figur 12)

Konfigurationen av ett seismiskt stationsnät beror på den önskade lokaliseringsprecisionen och på tröskelmagnituden. Vid övervakning av en stimulering bör stationsnätet vara så tätt att det registrerar alla seismiska händelser inom området med en styrka av $M > 0$, och lokaliserar dem med en precision av cirka 200 m. Denna lokaliseringsprecision innebär att det är möjligt att skilja jordbävningar i berggrundens ytliga delar från sprängningar på markytan. För att med tillräcklig precision kunna lokalisera de djupaste jordbävningsskällorna, måste stationsnätets radie vara 1–2 gånger större jämfört med djupet av det område som övervakas. Om man till exempel önskar lokalisera jordbävningar ända ner till ett djup av 8 km, måste stationerna ligga inom en radie av 16 km från källan. En av stationerna placeras i nätets mittpunkt, så nära den sannolika punkten för koncentrationen av seismiciteten som möjligt. Centralstationen utrustas med både en seismometer och en accelerometer. Om stimulering ingår i projektet installeras accelerometrar även i objekt där det finns känslig utrustning. (Asanuma m.fl. 2004; Majer m.fl. 2007, 2012; Evans m.fl. 2010; Jung 2013)



Figur 12: Exempel på konfigurationen av ett stationsnät. Siffrorna i figuren motsvarar textens exempel.

Till den seismiska övervakningen hör även fastställandet av lösningarna för jordbävningarnas förkastningsplan. En praktisk regel för att få en tillförlitlig lösning för förkastningsplanet är att de tomma sektorerna (azimutluckorna) mellan stationerna kring en händelse är mindre än 90 grader sett från jordbävningen. I teorin nås målet med fem stationer förutsatt att de fungerar utan avbrott. Vid planering av stationsnätet bör dock beaktas eventuella störningar i stationerna och tidtabellen för reparationerna. Om det finns få stationer försämras lokaliseringsförmåga betydligt vid ett driftsavbrott vid en station. Övervakaren av seismiciteten kan kräva att kraftverket avbryter driften, om den nödvändiga stationskonfigurationen med tanke på riskhanteringen inte är funktionsduglig.

Precisionen vid lokalisering av seismiska händelser beror förutom på stationsnätets konfiguration även på många andra faktorer – bland annat stationernas brusnivå, lokaliseringsmetoden och jordskorpanns hastighetsmodell. Kartläggandet av dessa faktorer hör till stationsnätplaneringen. Seismometrar placerade i borrhål har ett bättre signal-brus-förhållande än mottagare placerade på markytan (Plenkers m.fl. 2015). Det är värt att överväga borrhålssensorer – speciellt i områden med ett tjockt jordtäckje eller sedimentlager eller i stadsområden med högt bakgrundsbrus.

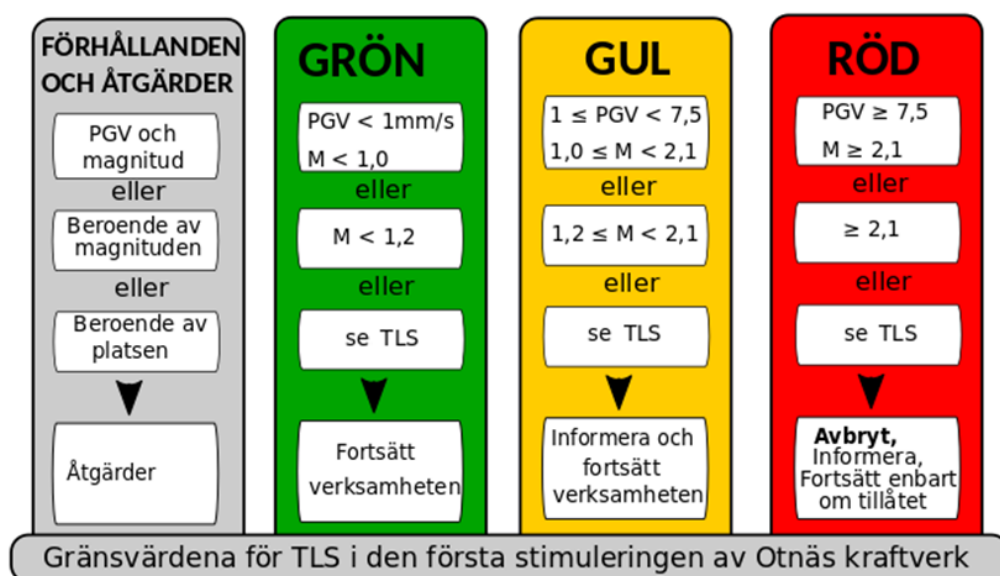
Det seismiska övervakningsnätet ska basera sig på etablerad teknik samt allmänt använda standarder och referenssystem. En redogörelse för dessa skall ingå i planen för stationsnätet. Till de obligatoriska uppgifterna hör bl.a. registreringsutrustningen inklusive metadata, tidsbestämnings- och koordinatsystemet, samt det digitala materialets lagringsformat.

Hanteringen av riskerna för inducerad seismicitet kräver övervakning i realtid. Flera kommersiella och icke-kommersiella automatiska analyssystem har utvecklats för detta ändamål. Dessa har optimerats för behandling av seismiska signaler registrerade på nära håll. Det finns dock många felaktiga observationer bland resultatet från det automatiska analyssystemet, vilket gör att de måste kontrolleras och vid behov analyseras på nytt manuellt.

4.4.1 Trafikljussystemet

Verksamhetsutövaren skall ansluta ett trafikljussystem (Traffic Light System, TLS) till analyssystemet och kalibrera det för verksamhetsområdet. Systemet varnar när den seismiska aktiviteten närmar sig gränsvärden som bestämts i samband med den seismiska hasardbedömningen. I TLS fastställts olika platsbundna tröskelvärden för en jordbävningens magnitud och för den maximala markhastigheten eller markaccelerationen. I likhet med trafikljus visar det färgat ljus för driften, som kan fortgå så länge ljuset är grönt. Gult ljus innebär att tröskelvärdet för försiktighetsåtgärderna överskridits, vilket kräver att anvisningarna angående lindring av den seismiska risken och informeringen tas i bruk. Driften kan fortsätta förutsatt att händelsen inte orsakat någon skada och seismicitetsnivån inte fortsätter att stiga. Rött ljus innebär att ett alarmerande gränsvärde överskridits och att driften omedelbart på ett säkert sätt skall avbrytas. Rapporteringen av händelsen och de nödvändiga åtgärderna är viktig. Driften får fortsätta först efter att den övervakande instansen ger tillstånd till det. I exemplet i figur 13 visas det trafikljussystem som användes under Otnäskraftverkets första stimulering.

I Finland bör magnituden i trafikljussystemet vara jämförbar med den magnitud Seismologiska institutet använder i det nationella stationsnätet.



Figur 13: Exempel på ett trafikljussystem, St1 (2018a).

Utöver magnituden och markrörelsen kan även t.ex. en kraftig ökning av antalet små seismiska händelser användas som ett tröskelvärde i trafikljussystemet. Utgående från TLS har ett nytt trafikljussystem utvecklats för kontroll av verksamheten. Detta är ett s.k. adaptivt trafikljussystem (Adaptive Traffic Light System, ATLS) och det ska förutse inducerad seismicitet på liknande sätt som väderleksprognoser görs upp. Inmatningsdata för ATLS består av bl.a. konstanta miljöparametrar, samt vatteninmatningsparametrar och data om seismicitet i realtid (Mignan m.fl. 2018).

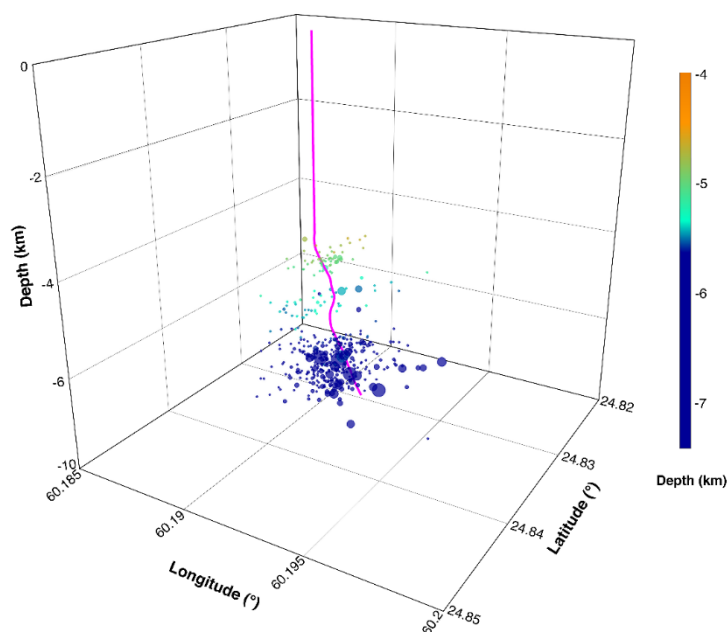
Tröskelvärdena i trafikljussystemet fastställs på basen av den seismiska responsen i området, och dessa uppdateras vid behov utifrån erhållna erfarenheter under driften. När tröskelvärdena fastställs är det bra att beakta att tätt på varandra inträffande jordbävningar, vilka allmänheten kan uppfatta, skapar en s.k. störande faktor (eng. nuisance factor) för projektet. Detta minskar den allmänna acceptansen för projektet och kan även göra det svårare att inleda nya projekt. Om tröskelvärdena sätts lågt inleds lindrande åtgärder tidigare, vilket minskar sannolikheten för händelser som eventuellt orsakar skador. Å andra sidan försämras projektets ekonomiska lönsamhet av alltför försiktiga tröskelvärden.

Lindringsåtgärder med tanke på den seismiska risken består bl.a. av att kontrollera vätskemängden och trycket, eller av att avsluta injiceringen på ett kontrollerat sätt. Eftersom den injicerade vätskan förändrar spänningstillståndet i den lokala berggrunden, upphör inte seismiciteten genom en omedelbar avslutning av injiceringen, utan det kan t.o.m. inducera mer seismicitet. Det finns exempel på EGS-projekt där de största inducerade jordbävningarna inträffat efter att vatteninjiceringen avslutats (Tabell 1). Det är säkrare att trycket minskas successivt tills en godtagbar seismicitetsnivå uppnås. Åtgärden eliminerar seismiciteten på lång sikt och ger således inte omedelbart resultat.

4.4.2 Erfarenheter från stimuleringsfasen i Otnäs kraftverksprojekt

Stimuleringen i det första borrhålet i Otnäsprojektet genomfördes 4.6.–23.7.2018. Före det hade St1 under borrhningsfasen upprättat två stationsnät för att övervaka seismiciteten och markrörelserna verksamheten orsakade. Till det första s.k. ytnätet hörde 13 accelerometrar placerade på markytan. Av dessa placerades 6 i omgivningar där det fanns känslig mätutrustning: Mejlans sjukhus, Acceleratorlaboratoriet vid Helsingfors universitet, Teknologiska forskningscentralen, Tieteen tietotekniikan keskus, Mätteknikcentralen och St1:s kontor på borrhningsplatsen. Det andra s.k. satellitnätet bestod av 12 seismometrar placerade i borrhål på cirka 300–1200 m djup. Detta nät var avsett för lokalisering och storleksbedömning av händelser i realtid. Seismologiska institutet övervakade verksamheten med ett nät bestående av permanenta stationer, 5 temporära stationer och St1:s satellitstationer.

Borrhningen av hål orsakade ingen betydande aktivitet som avvek från bakgrundsseismiciteten. Däremot registrerade Seismologiska institutets automatiska lokaliseringssystem under stimuleringsfasen över 5000 seismiska händelser inom en radie av 5 km från borrhningsplatsen. Alla händelser med en magnitud M 0 eller högre kontrollerades och analyserades på nytt manuellt. Av dessa var nästan 500 inducerade jordbävningar. Sammanlagt 48 händelser hade en magnitud över M 1,0 och överskred därmed tröskelvärde som kräver försiktighetsåtgärder. I enlighet med avtalet informerade St1 om dessa händelser och vilka åtgärder som vidtogs för att lindra den seismiska risken. Efter avslutad spräckning avklingade seismiciteten i området. Från avslutad stimulering fram till slutet av 2018 registrerades endast en jordbävning med en magnitud mer än M 1,0.



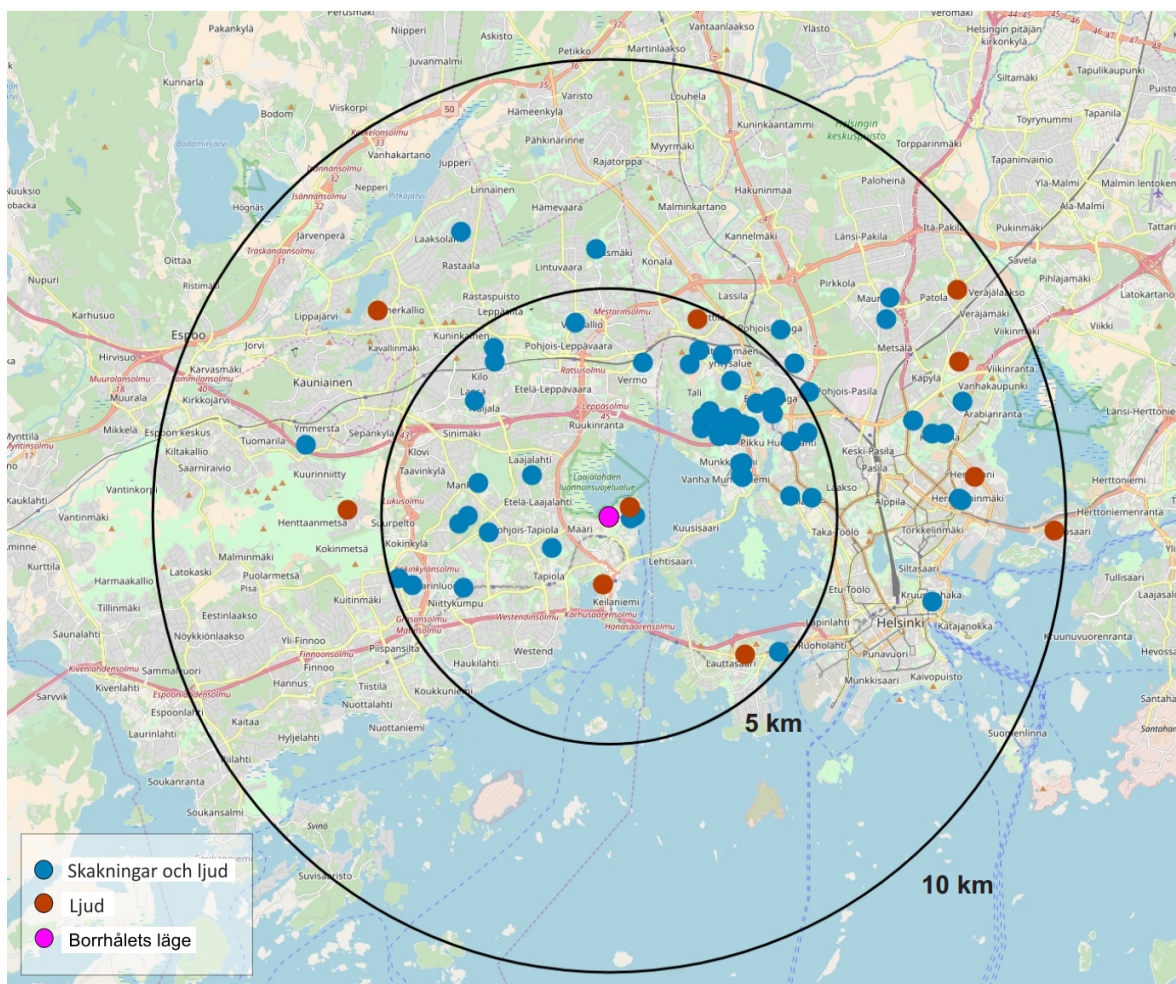
Figur 14: 3D-bild av de registrerade jordbävningarna kring borrhålet i Otnäs. Jordbävningarnas läge givna av Seismologiska institutet och hålkoordinaterna givna av St1.

Resultatet av den manuella analysen visar att skalvkällorna ligger på ett djup av 4–6 km och spridningen täcker ett område på cirka 200 m från borrhålet (Figur 14). Den 16.7.2018 uppmättes den största markhastigheten på 4,4 mm/s under ett skalv med M 1,8, vilket var klart mindre än de allmänna och platsspecifika tröskelvärdena (figur 13). Alla andra markrörelser orsakade av inducerade jordbävningar hade hastigheter mindre än 3 mm/s.

Trots att värdena för markrörelserna låg klart under tröskelvärdena fick Seismologiska institutet i samband med 23 olika skalv rapporter om vibrations- och ljudobservationer (Bilaga 1: tabell 3 och figurerna 16–17). Generellt sett förnimmas jordbävningar med en magnitud större än cirka M 1,5 i finländska tätorter på ett stort område. Detta beror på att de seismiska vågornas energi dämpas långsamt i den kristallina berggrunden i Finland. Därför kan ljud och vibrationer observeras mycket långt från händelseplatsen.

Figur 15 är en karta över rapporterade observationer efter jordbävningen med M 1,7 den 8.7.2018. Händelsen observerades på upp till 10 km avstånd från borrhålet. Observationerna är ojämnt fördelade – grovt uppdelat finns det fler observationspunkter öster om anläggningen än det finns på samma avstånd väster om den. Detta kan bero på att jordbävningsskällan strålar ut energin ojämnt i olika riktningar. Fördelningen av observationerna påverkas också av invånartätheten och byggnadsbeståndet, samt av marken. De seismiska vågorna förstärks av ett tjockt lager lös jord eller lerskikt under en husgrund (kapitel 4.2, figur 8) och kan därför lokalt öka ljud- och vibrationsolägenheterna. Det har också kommit rikligt med observationer från några byggnader som står på berggrund.

Sammantaget kan konstateras att markrörelsen till följd av inducerade jordbävningar under den första stimuleringsfasen i Otnäs klart underskred de tillåtna värdena. Trots detta var de ljud- och vibrationsolägenheter som de större ($M > 1,5$) inducerade skalven orsakade betydande. Dessa bör beaktas även i kommande riskanalyser.



Figur 15: En karta över de rapporterade ljud- och vibrationsobservationer efter jordbävningen (M 1,7) den 8.7.2018. Cirklarna har radier på 5 respektive 10 km från borrhålet. De blå punkterna representerar ljud- och vibrationsobservationer, medan de röda är ljudobservationer. Den ljusröda punkten visar borrhållets placering på markytan.

5. Rekommendationer för tillståndsansökningar gällande djupa geotermiska kraftverk

Tillståndsansökan för ett geotermiskt kraftverk bör fungera som stöd i den tekniska och juridiska kommunikationen. För att få allmänhetens och den reglerande instansens godkännande är avsikten att identifiera kraftverkets potentiella miljökonsekvenser och risker, samt att lägga fram en trovärdig tillvägagångsplan. För alla djupgeotermiska kraftverksprojekt rekommenderas att det görs en riskbedömning. Baserat på resultatet i bedömningen dimensioneras riskhanteringen specifikt för varje projekt.

Rapportens rekommendationer gällande den seismiska riskhanteringen baserar sig delvis på rekommendationer av Förenta staternas energiministerium och det Internationella energirådet (IEA) (Majer m.fl. 2012), samt på ”god praxis” för seismisk riskhantering publicerad av Schweiz seismologiska tjänst (SED) (Wiemer m.fl. 2017). Rekommendationerna har anpassats till förhållandena i Finland med hjälp av riktlinjerna i Rakentamisen aiheuttamat tärinät (RIL 253-2010), utgiven av Finlands byggnadsingenjörsförbund, samt de erfarenheter Seismologiska institutet fick under St1:s första stimuleringsfas. Gällande övriga miljörisker tillämpades Geologiska forskningscentralens (GTK) miljögeologiska erfarenhet och synpunkter.

Det rekommenderas att tillståndsansökan innehåller följande utredningar:

1. Bakgrundsutredningar
 - Bedömning av seismiska risker
 - Kartläggning av tillåtna markrörelser
 - Bedömning av miljökonsekvenser
2. Övervaknings- och beredskapsplan
3. Plan för byggnadsplatsområdet, redogörelse för borrhöretekniken
4. Kommunikationsplan

5.1. Bakgrundsutredningar

Syftet med bakgrundsutredningen är att kartlägga ifall det valda läget är lämpligt för byggande av ett geotermiskt kraftverk. För bakgrundsutredningen i tillståndsansökan räcker det med en litteraturöversikt. Bedömningen av området görs för kraftverkets hela uppskattade verkningsområde. Kraftverkets eventuella seismiska risk, samt dess miljökonsekvenser, beaktas vid utvärderingen.

Verksamhetsutövaren ska ha omfattande kunskap om den seismiska responsen i området. De uppräknade indikatorerna i kapitel 4.1 ger en grov helhetsbild av den väntade seismiska aktiviteten:

- Kraftverkets funktionsprincip: är vattnet i kontakt med berget och ingår stimulering i byggfasen? Kraftverkets stimulerings- och driftsparametrar: den injicerade vätskemängden, flödes-hastighet, tryck och temperatur.
- Spänningsfältets riktning och storlek i förhållande till befintliga förkastningar. Förkastningarnas utbredning och bergmekaniska egenskaper.
- Regional geologi, bergart och bergets mekaniska egenskaper. Hydrogeologiska egenskaper, såsom bergets porositet och permeabilitet, portryck och underjordiska vattenförekomster.

Bedömningen uppdateras under projektets gång då nya forskningsdata erhålls. Genom borrhåls-mätningar kan bl.a. sprickzoner och strukturgeologi vilka korsar hålet, samt bergets fysikaliska egenskaper kartläggas.

5.1.1 Kartläggning av seismiska risker i området

Rekommendationerna för övervakningen beror på om den vätska kraftverket använder för värmetransporten är i kontakt med berggrunden. Den seismiska risken är liten när hålet är helt inkapslat. Den seismiska risken är större ifall vätskan är i kontakt med berget, och då bör verksamheten övervakas noggrannare. Den seismiska risken är störst då berget stimuleras, och då bör övervakningen dimensioneras enligt den. Anvisningarna i denna rapport har utarbetats i huvudsak för en situation där stimulering utförs eller där vätskan för värmetransporten är i kontakt med berggrunden.

Bestämningen av den seismiska hasarden och risken beskrevs i kapitel 4.3. Den i Schweiz utvecklade GRID-riskhanteringsmodellen (Trutnevyte & Wiemer 2017) kan användas vid val av läget för anläggningen, och beskrivs här som ett exempel på ett riskanalysverktyg. I modellen beaktas den seismiska hasarden, utsatta byggnader och befolkningen, områdets sårbarhet (t.ex. regional geologi, byggnadernas skick), och den sociala responsen till projektet. Geotermiska projekt kan på basen av resultaten delas upp i olika riskklasser för vilka det finns olika övervakningsrekommendationer. I bilaga 2 finns mer information och ett exempel på en GRID. Modellen kan inte direkt tillämpas i finländska förhållanden, men den ger en bra bild över vilka frågor som bör beaktas i riskhanteringen. Från modellen kan det skräddarsys en modell för finländska förhållanden.

5.1.2 Kartläggning av tillåtna markrörelser

De tillåtna markrörelserna inom verkningsområdet med tanke på byggnader och miljön utreds efter det preliminära platsvalet. Dessutom fastställs eventuella fallspecifika planeringskriterier för känsliga omgivningar. Känslig infrastruktur finns t.ex. i sjukhus och forskningslaboratorier i närheten. Utöver dessa bör historiskt värdefulla och skyddade objekt beaktas. Området där verkningarna kan förnimmas avgränsas i tillståndsansökan och för markrörelsen fastställs tröskelvärden. Kartläggningen görs på basen av kapitel 4.2.

5.1.3 Bedömning av miljökonsekvenser

De miljörelaterade riskfaktorerna förknippade med ett geotermiskt kraftverk kan anges separat för bygg- och produktionsfasen. Till byggfasen hör borrning och en eventuell stimulering. Borrningsfasen kan jämföras med byggnadsverksamhet som orsakar förändringar i mark och berggrund, och produktionsfasen med stabil drift av en anläggning för produktion av förnybar energi. Trots att byggfasen är tidsmässigt begränsad har den större betydelse för miljökonsekvenserna än den egentliga produktionsfasen.

När rapporten skrevs tillämpade man i tillståndsförfarandet för en geotermisk energianläggning bestämmelserna i MBL:s 126 § om åtgärdstillstånd eller 125 § om bygglov. Från fall till fall bör det bedömas ifall projektets läge eller andra aspekter innebär att det behövs ett miljötillstånd enligt miljöskyddslagen och/eller ett bedömningsförfarande enligt MKB-lagen. Enligt 6 § i miljöskyddslagen skall verksamhetsutövaren känna till verksamhetens miljökonsekvenser, miljörisker och hanteringen av dem, samt möjligheterna att minska verksamhetens negativa miljöpåverkan.

De geotermiska energiproduktionsanläggningarna ingår inte i projektförteckningen i bilaga 1 till lagen om förfarandet vid konsekvensbedömning (252/2017, MKB-lagen), och därmed krävs det inte automatiskt någon bedömning av deras miljökonsekvenser. Anläggningarna kan dock omfattas av förfarandet enligt 3 § 2 mom. i MKB-lagen, om de till sin art och omfattning kan antas medföra betydande miljökonsekvenser, även med de sammantagna konsekvenserna av olika projekt, jämförbara med konsekvenserna av de projekt som avses i lagens projektförteckning. Å andra sidan nämns till exempel geotermiska djupborrningar, som utförs inom gruvindustrin, i bilaga II till direktivet om bedömning av inverkan på miljön (2011/92/EU). För de i bilagan nämnda projektens del föreskriver direktivet att man från fall till fall skall granska om de kan antas medföra en betydande miljöpåverkan till följd av deras art, storlek eller läge.

Markanvändning

När denna rapport skrevs fanns det i Finland ingen egentlig lagstiftning gällande tredimensionella fastigheter, eller angående ägo- och nyttjanderätt på flera kilometers djup under markytan (bortsett från gruvtillstånd för utvinning av gruvmineraler enligt gruvlagen (621/2011)). Angående borrning av värmebrunn för utnyttjande av jordvärme finns bestämmelser i 126a § 12 punkten i MBL, där borrningen betraktas som en åtgärd vilken kräver åtgärdstillstånd.

Byggandet av en geotermisk energiproduktionsanläggning får inte stå i konflikt med den plan som godkänts för området (landskaps-, general- eller detaljplan). För att identifiera eventuella riskfaktorer bör markanvändningssituationen i området och dess omgivning utredas med tillräcklig noggrannhet. Ett tillräckligt stort område bör fastställas som anläggningens möjliga verkningsområde, och hela området bör omfattas vid granskningen av markanvändningen. Vid granskningen ska även underjordiska konstruktioner och verksamheter i närområdet beaktas, samt även en eventuell plan för de underjordiska

områdena. I en plan kunde man även anvisa ett område för en geotermisk energiproduktionsanläggning, vilket i dagens läge ofta görs för t.ex. vindkraftverk. Då skulle byggandet av produktionsanläggningen kopplas till planläggningsprocessen och dess tillståndsförfaranden.

Naturobjekt

Ett geotermiskt kraftverk och byggandet av det får inte äventyra landskap, naturvärden eller kulturarv i området eller dess omgivning. Utlåtande gällande projektet begärs av NTM-centralen (naturvårdslagen 1096/1996, 6 §) ifall det i området eller dess omgivning finns för naturvärden betydande områden, eller i planen anvisade rekreation- eller skyddsområden. Verksamhetsutövaren för värmeanläggningen ska utreda eventuella konsekvenser under både borrhningen och den egentliga produktionsfasen ifall det i området finns i naturvårdslagen avsedda naturobjekt.

Geologi

Mark- och berggrundsförhållandena vid det geotermiska kraftverket och i dess närområde ska beskrivas med tillräcklig noggrannhet. Utredningen klarlägger områdets berggrund, samt tjockleken, kornstorleken och kvaliteten på jordlagret ovanpå berggrunden. Vid undersökning av jordlagret bör man fästa särskild uppmärksamhet vid dess geotekniska egenskaper (om vibration i punkten Buller och vibrationer under byggfasen). Om det misstänks att jordtäcket är förorenat t.ex. till följd av eventuella tidigare förorenande aktiviteter, ska föroreningen av jordtäcket och saneringsbehovet utredas enligt 14 kap. i miljöskyddslagen innan borrhningsprojektet inleds. Gällande berggrunden utvärderas spatialt den dominerande bergarten, berggrundens fragmentering och möjliga krosszoner. Av speciell vikt för berggrundens del är att identifiera eventuella förekomster av radioaktiva mineraler (borrhavfallets behandling under punkten Borrhavfall).

Vatten

Det geotermiska kraftverket och byggandet av det får inte äventyra tillståndet i vattendragen i området. Utgående från områdets topografi kan man bedöma dagvattnets strömningsriktning och dess eventuella förbindelser till vattendrag i omgivningen. Ett miljötillstånd (MSL 27 §) bör ansökas ifall verksamheten möjligen kan orsaka förorening av vattendrag.

Grundvatten

Ett geotermiskt kraftverk och byggandet av det får inte äventyra mängden grundvatten och dess kvalitet i området, eller objekt i naturen eller den byggda miljön vilka är beroende av grundvattnet (förbud mot förorening av grundvatten, MSL 17 §). Med grundvatten avses här grundvatten som finns i både marken och berggrunden. Särskild uppmärksamhet ska fästas vid eventuella konsekvenser ifall projektet är beläget i ett grundvattenområde. Eftersom projektet kan förändra grundvattnets kvalitet eller mängd bör det för objekt belägna i ett grundvattenområde i regel ansökas om ett tillstånd enligt 3 kap. 2 § 1 mom. i vattenlagen (587/2011). För tillståndsansökan utreds områdets hydrogeologi, grundvattnets tillstånd,

grundvattnets ytnivå och flödesriktning, samt den tid det tar för grundvattnet att strömma från objektet till brunnar eller vattentäkt. Dessutom utvärderas vilka konsekvenser byggandet av och produktionen vid kraftverket har för grundvattnets kvalitet och kvantitet. Det utarbetas också en skyddsplan över åtgärder för att skydda grundvattnet. Under borrningen och produktionen skall man ombesörja för att djupt salthaltigt berggrundvatten inte hamnar i jordtäckets akvifer.

Borravfall

Enligt 5 § i avfallslagen (646/2011) är ett ämne eller föremål inte avfall utan en biprodukt, om det uppkommer genom en produktionsprocess vars huvudsyfte inte är att producera ämnet eller föremålet. Den fortsatta användningen av det uppkomna ämnet skall vara säkerställt för att det skall beaktas som en biprodukt. Enligt 16 § i avfallsförordningen (179/2012) skall innehavare av byggavfall ombesörja för att avfallet återanvänds, återvinns eller utnyttjas på annat sätt. Vid ett förstärkt geotermiskt kraftverk är den vid borrning uppkomna borrhingsresten avfall p.g.a. att den inte i sig uppfyller kriterierna för en biprodukt. Borrhingsresten består dels av jordmaterial och stensmjöl, vilka uppkommer under borrning i jord och berggrund, dels av injicerat vatten i borrhålet, och dels av eventuella i vattnet tillsatta kemikalier med vilka vätskans viskositet regleras under borrningen. Använda kemikalier behandlas närmare i punkten Hantering av kemikalier.

Borravfallet från borrhålet under borrhingsfasen och driften av en geotermisk anläggning består av vattenhaltigt slam – s.k. borrhax. Detta borrhax är en kombination av stendamm (och jordmaterial när man i början borrar genom det lösa jordlagret), vatten som använts vid borrningen, samt eventuella kemikalier tillsatta i vattnet. Den kemiska sammansättningen av borrhaxet beror således på bergarterna man borrar i och de eventuellt tillsatta kemikalierna. Verksamhetsutövare i vars produktion det uppkommer avfall skall enligt 8 § i avfallslagen i mån av möjlighet iaktta en prioritetsordning för avfallet. Denna ordning består av att minska avfallets mängd och skadlighet, att förbereda avfallet för återanvändning, återvinning, eller utnyttjande på något annat sätt, samt i sista hand bortskaffning av det. Producenten skall enligt 12 § i avfallslagen känna till det under produktionen uppkomna avfallet, dess miljö- och hälsopåverkan, samt möjligheterna för att minska dess mängd och skadlighet. Den i vars verksamhet materialet uppkommer bedömer i första hand avfallets karaktär.

Verksamhetsutövaren skall enligt avfallslagen på behörigt sätt ombesörja borrhaxavfallets hantering. Obehandlat borrhaxavfall får under borrning, lagring eller transport inte hamna i vattendrag eller någon annanstans i miljön. Borravfallet skall behandlas på behörigt sätt antingen på plats eller transporteras till något annat ställe för behandling. Innan borrningen inleds skall det vara klart hur borrhaxavfallet bortskaffas.

Vattnet kan under borrningen på ort och ställe filtreras, rengöras och återanvändas i borrhingsprojektet. Det under borrningen använda vattnet får dock inte släppas ut i miljön eller avloppsnätet som sådant, utan en separat utredning och behandlingsplan bör göras för den behövliga vattenreningen. Denna plan

skall ingå i tillståndsansökan. Avfallet från filtreringen och reningen av vattnet ska behandlas på motsvarande sätt som det egentliga borrhavfallet. Bedömningen av mängden borrhavfall grundar sig på antalet borrhål, samt på deras diameter och djup.

Under produktionsfasen kan man då och då vara tvungen att spola borrhålen. Det vid underhållet uppkomna stenmjölet bör behandlas på motsvarande sätt som borrhavfallet från borrhålen.

Radioaktiva ämnen och strålning

Den vanligaste bergarten Finland är granit och den innehåller små mängder av radioaktiva mineraler. Dessa mineraler orsakar varken fara eller olägenhet under borrhålen. Det har rapporterats att det under produktionsfasen i granitområden sker en koncentration och utfällning av radioaktiva mineraler i rören (Cuenot m.fl. 2015). Det har konstaterats att cirkulering av vätska på cirka 70 °C i berggrunden faller ut sulfatmineraler från baryt (BaSO_4) till celestin (SrSO_4), samt sulfidmineralet blyglans (PbS). Av de nämnda mineralerna binder sulfiderna i huvudsak radon, sulfaterna radium och blyglans bly. Med tanke på strålningsexponeringen är det av betydelse att radiumisotoperna Ra-226 och Ra-228 kristalliseras i sulfaterna, av vilka speciellt Ra-226 är långlivad. Förutom sulfater, sulfider och andra utfällningar kan det under den geotermiska energiproduktionen i rören och på filtren bildas t.ex. metalliskt bly, som en följd av elektrokemiska reaktioner beroende på vattnets och berggrundens sammansättning. De naturligt radioaktiva ämnena Pb-210 och Po-210 kan anrikas i blyhaltiga utfällningar och reaktionsprodukter (Päivi Kurttio, skriftligt meddelande 18.1.2019). Den potentiella förekomsten av radioaktiva mineraler bör beaktas. Dessutom bör borrhålsresten undersökas tillräckligt noggrant vad gäller eventuell radioaktivitet och aktivitetskoncentrationer.

Det förekommer olika kemiska förhållanden i öppna system för geotermisk energiproduktion. Dessa kan beroende på vattnets och berggrundens sammansättning leda till att utfällningar eller elektrokemiska reaktionsprodukter samlas i t.ex. rör, ventiler, filter eller värmeväxlare. Det kan förekomma förhöjda halter av naturliga radioaktiva ämnen i dessa material. Med tanke på detta bör strålningsexponering orsakad av den geotermiska energiproduktionen utredas. Även verksamhetens avfall bör beaktas i utredningen. Skyldigheten att kartlägga strålningsexponeringen gäller i princip endast geotermisk energiproduktion med ett öppet system. Oberoende av det använda systemet gäller referensvärdena för naturlig strålning för både yrkesmässig exponering och allmänhetens exponering förorsakad av byggprodukter (Social- och hälsovårdsministeriets förordning om joniserande strålning (1044/2018, 23 och 26 §)). Borrhålsfasen och dess avfall bör också beaktas (Päivi Kurttio, skriftligt meddelande 18.1.2019).

Verksamhetsutövaren är enligt 22 § i strålsäkerhetslagen (859/2018) ansvarig för strålsäkerheten i sin verksamhet. Detta ansvar kan inte överföras på någon annan. Eftersom radioaktivt avfall inte hör till avfallslagens (646/2011) tillämpningsområde är utgångspunkten att det omfattas av strålsäkerhetslagen. Enligt strålsäkerhetslagen avses med radioaktivt avfall att ett radioaktivt ämne måste oskadliggöras i

fråga om sin radioaktivitet. Det är dock ändamålsenligt enligt regeringens proposition (RP 28/2018) att det till strålsäkerhetslagens tillämpningsområde bara hör sådant avfall där mängden radioaktiva ämnen är så stor att strålsäkerheten förutsätter från annat avfall avvikande avfallshanteringslösningar. Utgående från avfallslagen kan sålunda avfall där mängden radioaktiva ämnen är mindre än friklassningsnivån i 85 § 2 mom. i strålsäkerhetslagen återanvändas, återvinnas, utnyttjas på annat sätt eller bortskaffas. Verksamhet exponerad för naturlig strålning ger inte upphov till sådant radioaktivt avfall som avses i strålsäkerhetslagen (strålsäkerhetslagen 78 § 3 och 4 mom. och statsrådets förordning 1034/2018 31 §). Det avfall som avses i 78 § 3 mom. i strålsäkerhetslagen bör dock på behörigt sätt åtgärdas med beaktande av strålsäkerhetsaspekterna. I Strålsäkerhetscentralens föreskrift gällande frigränser och friklassningsnivåer (SY/1/2018) har det fastställts friklassningsnivåer för naturligt förekommande radioaktiva ämnen, vilka förekommer i fasta material och länge varit i sekulär jämvikt med sina sönderfallsprodukter. För övrigt fall finns bestämmelser gällande verksamhet exponerad för naturlig strålning i en separat föreskrift utfärdad av Strålsäkerhetscentralen (S/3/2019). Enbart om naturliga radioaktiva ämnen används som strålningskällor tillämpas frigränser på dem (Päivi Kurttio, skriftligt meddelande 18.1.2019).

Strålningsskyddet gällande allmänheten och arbetstagare utsträcks även till avfallet enligt 78 § 3 mom. i strålsäkerhetslagen. Detta gäller avfall där strålsäkerheten behöver beaktas i avfallshanteringen, även om det inte är fråga om radioaktivt avfall i enlighet med strålsäkerhetslagen. Verksamhetsutövaren skall ombesörja för att radioaktiva ämnen inte förorsakar någon skada för hälsan eller miljön. Verksamhetsutövaren har också ansvar för sina arbetstagares strålningsskydd (STUK 2017).

Damm

Lagen angående vissa grannelagsförhållanden (26/1920) föreskriver att en fastighet inte får användas så att grannarna eller de som bor i närheten orsakas oskäligt besvär av miljöskadliga ämnen, sot, smuts, damm, lukt, fukt, buller, skakning, strålning, ljus, värme eller annan motsvarande påverkan. Borrning skall således ordnas så att damm inte sprids i omgivningen. Dessutom skall man ombesörja för att trafiken till objektet inte ökar dammbelastningen i området.

Buller och vibrationer under byggfasen

Byggandet, stimuleringen och produktionen vid ett geotermiskt kraftverk orsakar buller och vibrationer i närområdet. Innan ett borrhingsprojekt inleds skall man klarlägga arbetets bullernivå och ordna borrhingsförhållandena så att riktvärdena för bullernivån i statsrådets beslut 993/1992 inte överskrids. I enlighet med 118 § i miljöskyddslagen skall det vid behov göras en bulleranmälan om borrhingsarbetet till den ansvariga tillståndsmyndigheten. Vibrationer orsakade av borrhningen kan innebära en betydande olägenhet för invånarna, fastigheterna eller annan verksamhet i närområdet. Ett allmänt stöd vid planering av nya trafikleder är vibrationskartläggning och avgränsning av vibrationsområden (Talja och Törnqvist 2014). Detta kan även tillämpas vid planeringen av byggprojekt för geotermiska kraftverk.

Det väsentliga är att utreda ifall vibrationerna under borrhning och produktion kan orsaka skador på byggnader, eller om vibrationerna kan orsaka resonans i konstruktioner inom verkningsområdet och på så sätt inverka på boendetrivsln. Vibrationernas spridning är enligt Talja och Törnqvist (2014) mest betydelsefull i mjuka och vattenhaltiga jordarter, dvs. huvudsakligen i lera, silt, dy och torv. Också markens strukturella hållfasthet och släntstabilitet kan påverkas av vibrationer. I värsta fall kan vibration leda till släntskred. Det har givits anvisningar för bedömning av boendetrivsln, rekommendationer för utförandet av mätningar, samt riktvärden för den maximala vibrationen (Talja 2011). Vibrationer orsakade av inducerad seismicitet behandlas separat i kapitel 4.

Trafik

I planen för byggnadsplatsområdet (kapitel 5.3) ska det ingå en redogörelse över den trafik projektet kräver, dvs. uppgifter angående trafikmängd, transportleder och tidpunkter, samt gällande parkerings-, lastnings-, lossnings-, underhålls- och tvättplatser. Särskilda trafikarrangemang kan behövas i synnerhet när borrhningen organiseras och utrustning förs till platsen. Dessutom kan borrhavfall möjligen transporteras till en annan plats för behandling och utnyttjande. Eftersom borrhavfallet kan vara vått bör detta beaktas vid val av transportmedel. Trafikarrangemangen ska planeras innan projektet inleds.

Hantering av kemikalier

Kemisk behandling kan förbättra brunnens produktivitet. Val av den kemiska behandlingsmetoden bör göras utifrån både berggrundens geologiska och grundvattnets egenskaper. Således får en kemisk behandlingsmetod inte kopieras från ett projekt till ett annat. I synnerhet skall man inte till finländska förhållanden kopiera verkningsätt använda i områden med en annan sorts berggrund. Man bör på förhand, genom geokemiska undersökningar, klarlägga de använda kemikaliernas kemiska reaktioner, deras slutprodukter, samt deras inverkan på förhållanden i naturtillstånd.

I yngre formationer i Finlands berggrund kan kemisk behandling användas för att öka bergartens permeabilitet, och/eller för att avlägsna s.k. cementerande mineraler vilka förhindrar användningen av brunnen – t.ex. sandstensområdet i Satakunta och/eller lerstensområdet i Muhos. Det krossade stenmaterialets (borrkaxets) rörelse effektiviseras i borrhfasen med kemiska blandningar och därmed blir hålet ”rengjort”. Vid kemisk behandling är den vanligaste kemikalien en s.k. lersyra (eng. mud acid), vilket är en svag blandning av saltsyra (HCl) och fluorvätesyra (HF). Syrornas blandningsförhållande beror på bergartens mineralogi och berggrundens permeabilitet (Crowe m.fl. 1992). För att förhindra transportrören för vätskan att gå sönder eller tilltäppas, kan även korrosionsinhibitorer och syror som förhindrar utfällning av järn användas.

Om kemikalier används under borrhningen eller i produktionsfasen ska transport, lastning, lossning, användning och lagring vara anpassad till deras art (kemikalielagen 599/2013). Märkning, klassificering, användning och förpackning av kemikalierna skall följa EU:s REACH- och CLP-förordningar (REACH-förordningen (EG 1907/2006) angående registrering, utvärdering, godkännande

och begränsning av kemikalier, samt CLP-förordningen (EG 1272/2008) angående klassificering, märkning och förpackning av kemikalier). Behovet gällande möjliga tillstånd för lagring och hantering av kemikalierna beror på kemikaliernas art och mängd.

Särskild uppmärksamhet bör fästas vid arbetarskyddet och anvisningarna i kemikaliekorten.

Anläggningens energieffektivitet och klimatesiliens

Det rekommenderas att man i tillståndsansökan redogör för projektets fördelar med tanke på energiproduktionen. De minskade koldioxidutsläppen från utnyttjandet av geotermisk energi kan nämnas i tillståndsansökan projektvis. Väsentligt är att identifiera vilken traditionell energiform den geotermiska energin ersätter, samt projektvis hur stora inbesparingarna i CO₂-utsläppen blir. CO₂-utsläppen kan beräknas exempelvis med hjälp av Motivass guide 12/2012 ”Yhteenvetojen CO₂-päästöjen laskenta-ohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet”. Det rekommenderas att storleken på CO₂-utsläppen jämfört med fossil energiproduktion uppföljs och uppdateras under anläggningens hela drifttid.

Det totala CO₂-avtrycket för den geotermiska anläggningen kan även beräknas och jämföras med fjärrvärme producerad med stenkol och/eller med bioenergiproduktion. Beräkningarna av CO₂-avtrycket bör göras med hänsyn till anläggningens planerade driftslängd, t.ex. 50 år. Beräkningarna skulle således omfatta även underhållet av anläggningen inklusive påverkan av trafik och annat.

5.2 Övervakning och beredskapsplaner

I tillståndsansökan skall ingå en uppskattning över verksamhetens miljörisker, hur de övervakas och vilken beredskapen är i fall de realiserar. Dessutom skall det ingå en plan för agerande i eventuella olyckssituationer. Även behovet av andra tillstånd utreds från fall till fall i tillståndsansökan. För borringen, stimuleringen och den egentliga driften kan en beredskapsplan enligt 15 § i MSL vid behov utarbetas. I tillstandsplanen skall det ingå en plan för den seismiska övervakningen vid kraftverket (se kapitel 4.4). Trots att rekommendationerna främst gäller övervakningen i EGS-projekt, kan de med fördel även tillämpas vid projekt för djupborrning där ingen stimulering ingår. Erfarenheter av den senare och dess seismiska risker finns än så länge inte för finländska förhållanden.

Det rekommenderas att tillståndsmyndigheten för kraftverkets verksamhetsområde utser en oberoende övervakare av seismiciteten för projektet. Övervakaren har tillgång till det seismiska övervakningsnätets realtidsregistreringar, kraftverkets driftsrapporter, samt resultatet från de automatiska och manuella analyserna. Exempelvis befullmäktigade Esbo stad Seismologiska institutet att övervaka genomförandet av trafikljussystemet i Deep Heat-projektet i Otnäs. Oberoende om Seismologiska institutet utses till övervakare eller inte, bör institutet hållas informerat om projektets driftstadier. Detta eftersom övervakningen av seismiciteten i Finland hör till institutets uppdrag, och även p.g.a. att institutet ofta är den första instans som kontaktas angående ljud- och vibrationsobservationer.

Minst en i realtid fungerande station skall fogas till det nationella övervakningsnätet som Seismologiska institutet upprätthåller. Detta är i linje med anvisningar givna av internationella atomenergiorganet IAEA angående seismisk övervakning i kärnkraftsområden (IAEA, 2010). Det möjliggör också kalibrering av de inducerade jordbävningarnas magnituder till den nationella magnitudskalan.

Överskridningar av tröskelvärdena i trafikljussystemet bör rapporteras till projektets projektchef, tillståndsmyndigheten, ansvariga för övervakning och kommunikation, samt Seismologiska institutet (kapitel 5.4). Verksamhetsutövaren förbereder lägesrapporten som skickas till instansen för den seismiska övervakningen och till Seismologiska institutet.

Det rekommenderas även att projektet har säkerhet eller en försäkring, vilken kan ersätta eventuella skador kraftverkets olika driftsfaser orsakar.

5.3 Planen för byggnadsplatsområdet, redogörelse för borrhörtekniken

Det rekommenderas att planen för byggnadsplatsområdet utarbetas separat för borrhörningen, stimuleringen och driften av anläggningen. I planen beskrivs arbetsområdets användning och dess aktiviteter. Både grannskapet (lagen angående vissa grannlagsförhållanden (26/1920)), och arbetsplatstrafiken bör beaktas vid planeringen av områdesanvändningen. Då planen för byggnadsplatsområdet fogas till tillståndsansökan skall den uppfylla eventuella kommunspecifika specialkrav – t.ex. angående placering av borrhål i förhållande till grannfastighetens gräns. En separat riskbedömning gällande arbetssäkerheten hör till planeringen av byggnadsplatsområdet. I denna ingår en genomgång, identifikation och presentation för en plan gällande riskfaktorer relaterade till arbetssäkerheten samt hur de kan minimeras.

Kraftverkets hela livscykel bör omfattas av planen för byggnadsplatsområdet. Av denna anledning beskriver den även användningen av arbetsområdet under kraftverkets drift, samt efter nedkörningen. I planen beskrivs även vad man skall göra med hålen efter avslutad kraftverksverksamhet, hur hålen eventuellt stängs och riskerna förknippade med detta.

Vid geotermisk borrhörning används i hög grad traditionell rotationsborrhörteknik, samt olika hammar-tekniker. Priset på borrhörningen i geotermiska projekt stiger ifall berggrunden är hård och kristallin. Även borrhördjupet och riktad borrhörning inverkar på priset. Borrhörhålen har en stor diameter och flödesmängden i dem är riklig. För att förhindra ras fodras och cementeras hålen. Eftersom syftet är att producera värme måste utrustningen för borrhörning och borrhörhålsloggning, samt rörmaterialet tåla hög temperatur och högt tryck, samt eventuellt i borrhörhålet cirkulerande kemikalier. Verksamhetsutövaren ansvarar för att fodringen och cementeringen är tillräcklig och hel. (Finger & Blankenship 2010; Hirschberg m.fl. 2015.)

Borrhörning med luft- och vattenhammare är effektivare tekniker än rotationsborrhörning. Den använda gasen eller vätskan i dessa tekniker kyler ner borrhörkronan, lyfter upp borrhöravfallet ur hålet och förhindrar ras i

ett ofodrat hål. Trots sina benämningar används i allmänhet varken luft eller vatten i dessa tekniker. I stället används utgående från bergarten och borrhstekniken kemiskt förbättrade blandningar med optimala egenskaper, såsom densitet och viskositet (Hirschberg m.fl. 2015). Utöver hammartekniken har man vid borrhningen även tagit i bruk nya möjligheter såsom plasma. Eftersom branschen växer är de här nämnda teknikerna inte de enda möjliga.

I planen för byggnadsplatsområdet beskrivs den planerade borrhstekniken, borrhtrustningen och dess krav, foderrörens material och storlek, pumparna och den planerade pumpmängden, borrhtryck, under borrhningen eventuellt använda kemikalier och hur dessa skall hanteras, samt hanteringen av borrhavfallet. I planen bör även redogöras för de i den övre delen av borrhålet eventuellt gjorda ”källarutrymmena”, samt andra planerade konstruktioner i den övre delen av produktionsbrunnen.

Uppdateringarna av planerna gjorda under arbetets gång, t.ex. rörande ytterligare cementeringar eller rotationsborrningar av svaghetszoner, skall skickas till tillsynsmyndigheten efter arbetet.

5.4 Kommunikationsplan

Vetskapen angående den geotermiska energiproduktionens fördelar och möjliga risker är generellt sett begränsad, vilket gör allmänhetens acceptans till en betydande utmaning – ju mindre vetskap allmänheten har angående projektet, desto negativare är uppfattningen (Wiemer m.fl. 2017). Förtroendet ökar genom kännedom gällande bakgrunden för myndighetssamarbetet och samarbetspartnerna. Därför är det väsentligt att verksamhetsutövaren ger information angående projektets övervakare samt vilka säkerhetsansvariga instanser som informerats.

En kommunikationsplan skall gärna ingå i tillståndsansökan. Från den skall det framgå tidsplanen för när de olika intressegrupperna informeras, samt de använda kommunikationskanalerna. Definieringen av kommunikationsansvaret är en del av planen, och kommunikationen ska upprätthållas under hela projektet. Det uppskattade verkningsområdet för den inducerade seismiciteten framgår ur planen, och hela detta område ska informeras – vid behov även över kommungränserna. Ett tidsschema över kommunikationen till olika aktörer under projektets gång kan bifogas till planen. Bl.a. följande intressenter/aktörer beaktas i kommunikationsplanen:

- Med **tillsynsmyndigheterna** kommer man överens om kommunikationsnivån under projektets gång, bl.a. om närmare tidsplaner, projektplaner (bl.a. gällande vattenpumpningarna) och information om undantagstillstånd under projektet.
- Med **övervakaren av seismiciteten** kommer man innan projektet inleds överens om en tidsplan för informerandet och om informationskanalerna. Under den aktiva byggfasen (borrning och stimulering) informeras övervakaren om undantagstillstånd, t.ex. överskridna tröskelvärden,

genast då den seismiska analysen är klar. Övervakaren informeras också om ändringar av driftsparametrarna och tidsplanerna, samt om längre störningar i det seismiska nätet.

- **Seismologiska institutet** övervakar seismiciteten i Finland. Eftersom institutet kontaktas i samband med observationer av jordbävningar och andra skakningar bör institutet informeras om projektet, och informationen skall helst ges redan innan byggfasen. Kontaktuppgifterna för den kommunikationsansvariga personen/gruppen skall ges till institutet. Även information om vart frågor gällande inducerade händelser skall hänvisas (t.ex. till projektets webbplats) bör ges.
- **Aktörer som använder känslig utrustning** (sjukhus, forskningsinstitutioner, osv.), samt **historiskt värdefulla eller annars skadekänsliga objekt** (kapitel 5.1) beaktas, och de kontaktas redan vid planeringen av kraftverkets läge. I planen anges hur man kommunicerar med dessa när tröskelvärdena överskrids.
- **Lokala säkerhetsmyndigheter.** Efter kraftigare seismiska händelserna kan områdets invånare även kontakta nödcentralen. Innan borring och stimulering skall därför räddningsmyndigheterna och vid behov polisen informeras om projektet. Man skall komma överens om hur och i vilka situationer det ska informeras gällande seismiska händelser, vilka överskrider tröskelvärdena och eventuellt observeras ovan jord.
- **Invånarna i verkningsområdet och de som arbetar i området** skall informeras om projektet innan borring och stimulering inleds. I kommunikationsplanen definieras det område till vilket informationen riktas, samt vilka de använda kanaler är, t.ex. möten för allmänheten, pressen, internet. En aktiv kanal för projektet (t.ex. webbplatsen eller sociala medier) skall finnas åtminstone för stimuleringsfasen. Här ska information ges angående projektets avancerande och om undantagstillstånd, såsom överskridningar av de seismiska tröskelvärdena.

6. Rekommendationer gällande uppföljningen och övervakningen av kraftverkets drift

Rekommendationerna gällande övervakningen grundar sig på kraftverkets driftsätt. Den seismiska risken är liten ifall brunnen är helt fodrad och den cirkulerande vätskan inte är i kontakt med berget. Varken riskanalys eller seismisk övervakning krävs för ett sådant kraftverk. Speciellt ifall kraftverksprojektet har lett till motstånd eller oro kan övervakning dock öka förtroendet och transparensen. (Wiemer m.fl. 2017.)

Verksamheten bör övervakas ifall vätskan vid värmeutvinningen är i kontakt med berget, eftersom den seismiska risken då är större. Den seismiska risken är störst ifall stimulering ingår i byggfasen och den seismiska övervakningen bör då dimensioneras därefter. Om den seismiska övervakningen är rätt dimensionerad är det möjligt att med hjälp av den lokalisera eventuella inducerade jordbävningar. Dessutom är det möjligt att avgöra ifall skalven orsakades av kraftverket. Stationsnätet bör vara funktionsdugligt under kraftverkets hela livscykel, och även efter att driften körts ner.

Övervakningsrekommendationerna i detta kapitel ges separat för de olika faserna i kraftverkets livscykel och är uppdelade i seismisk riskhantering och annan miljöövervakning.

6.1 Byggfasen

Till byggfasen hör borrning av hål och en eventuell stimulering.

Seismisk övervakning

Ett seismiskt övervakningsnätverk skall, som nämndes i kapitel 4.4, byggas i god tid innan byggfasen inleds, eftersom det krävs en övervakningsperiod på 1–6 månader för att testa stationernas funktion och kartlägga nivån på bakgrundsseismiciteten. Innan borrningen inleds skall dataförbindelserna till både övervakaren av seismicitetens och Seismologiska institutets servrar fungera. I nätets centralstation rekommenderas det att det utöver en seismometer också installeras en accelerometer. Ifall det ingår stimulering i projektet skall accelerometrar även installeras i objekt där det finns känslig utrustning eller andra specialkrav.

Det i realtid fungerande övervakningsnätet, det automatiska analyssystemet och dataförbindelserna ska fungera under borrningen. Den manuella analysen av seismiska händelser görs under normal arbetstid.

Den seismiska riskhanteringen under stimuleringen förutsätter att seismiciteten övervakas i realtid och att det finns välfungerande dataförbindelser mellan projektets aktörer. Dessutom skall olika myndigheter informeras snabbt, samt även allmänheten så snart analysen är klar. Övervakningen och jouren skall fungera dygnet runt och då en händelse inträffar som överskrider tröskelvärdena görs en manuell analys genast. Verksamhetsutövaren ansvarar för stationernas och dataöverföringens tillförlitlighet även under eventuella problemsituationer.

Efter stimuleringen skall pumpningen avslutas på ett kontrollerat sätt. I en del kraftverk har detta orsakat den största jordbävningen i dess historia (se Tabell 1). Antalet skalv och deras styrka minskar när trycket sjunker, men eftersom trycket frigörs ojämnt kan det inducera skalv. Av den här anledning är det väsentligt att det i realtid fungerande övervakningsnätet, dess dataförbindelser och det automatiska analyssystemet hållas i funktionsdugligt skick även efter att pumpningen avslutats. Dessa skall upprätthållas tills seismiciteten återgått till sin naturliga nivå, men dock minst sex månader. Inom den normala arbetstiden ombesörjer verksamhetsutövaren för att den manuella analysen av händelser, vilka överskridit tröskelvärdena i trafikljussystemets, görs och att informationen vidarebefordras.

Miljöteknisk övervakning

Under borrhningsfasen skall man övervaka aktiviteter som är identifierade eller möjliga miljörisker, samt sådana som kan orsaka betydande förändringar i miljöförhållandena. Övervakningsplanen ska bifogas tillståndsansökan. Särskild övervakning krävs för buller, strålning, avfallshantering, kemikalieåtgång och grundvattnets tillstånd. Ur övervakningsplanen ska det framgå hur övervakningen förverkligas, inklusive dess tidtabell samt rapporteringen av resultaten.

6.2 Produktionsfasen

En övervakningsplan utarbetas för driften av kraftverket enligt vilken driften övervakas och kraftverket underhålls. Vid uppdatering av övervakningsplanen beaktas den information som övervakningsresultaten under byggfasen givit.

Seismisk övervakning

Seismiciteten avklingar vanligen under produktionsfasen, men den seismiska risken är fortfarande förhöjd. Samma stationsnät och automatiska analyssystem som under stimuleringsfasen används för övervakningen av seismiciteten. Händelser som överskridit tröskelvärdena i trafikljussystemet analyseras manuellt och information gällande dem ges under den normala arbetstiden. Vid behov uppdateras övervakningsplanen. Även om antalet stationer i övervakningsnätet minskas är det bra om en seismisk station förblir kopplad till det nationella nätet.

Miljöteknisk övervakning

Övervakningsplanen uppdateras vid behov. Under produktionsfasen kan den miljötekniska övervakningen avslutas, ifall inga betydande miljökonsekvenser konstateras eller om tidigare konstaterade konsekvenser minskat så mycket att en nästan naturlig nivå nåtts. På begäran av verksamhetsutövaren kan tillståndsmyndigheten göra beslut gällande ändringar av övervakningen och avslutandet av den.

6.3 Efterhandsövervakningen

Det utarbetas en plan för hur driften vid kraftverket körs ner. I planen uppmärksammas vad som görs med borrhålen och den pumpade vätskan. Till avvecklingsfasen hör också rivning av anläggningen och återställandet av miljön enligt kraven för fastighetens markanvändning.

Seismisk övervakning

Det finns någon mån av erfarenhet gällande förhöjt portryck i ett stängt borrhål, vilket har inducerat seismicitet då kraftverket körs ner. Det rekommenderas att produktionsfasens seismiska stationsnät upprätthålls i åtminstone 6 månader efter att produktionen vid kraftverket avslutats och pumpningen körts ner. Ifall den seismiska aktiviteten fortsätter bör enligt behov även övervakningen fortsätta.

Miljöteknisk övervakning

Det behövs ingen miljöteknisk övervakning under efterhandsövervakning ifall inga betydande miljökonsekvenser har konstaterats under produktionsfasens övervakning, eller om övervakningen av välgrundade skäl har avslutats i produktionsfasen. Ifall produktionsfasen har föranlett skyldighet till miljöövervakning skall denna fortsätta efter produktionen ända tills miljökonsekvensen har återfått en godtagbar naturlig nivå. Om detta avtalas separat med tillståndsmyndigheten.

7. Sammanfattning

I denna rapport ges grundläggande information angående de olika formerna av geotermisk energi och de eventuella riskerna förknippade med dem. Dessutom ges rekommendationer angående innehållet i tillståndsansökan för ett kraftverk, samt gällande övervakningen under de olika driftsfaserna.

I tillståndsansökan bör följande ingå:

1) Bakgrundsutredningar gällande områdets lämplighet för kraftverksdrift och dess påverkningsområde:

- Kraftverkets driftsprincip: Är vattnet i kontakt med berget och ingår stimulering i byggfasen? Kraftverkets driftsparametrar: Pumpad vätskemängd, flödes hastighet, tryck och temperatur.
- Spänningsfältets riktning och storlek i förhållande till befintliga förkastningar. Förkastningarnas utbredning och bergmekaniska egenskaper.
- Regional geologi, bergart, samt bergets mekaniska egenskaper. Hydrogeologiska egenskaper, såsom bergets porositet och permeabilitet, portryck och underjordiska vattenförekomster.

2) Utredningar gällande inducerad seismicitet:

- Utredning av tillåtna markrörelser.

Byggbestämmelserna för området och förordningar gällande tillåtna markrörelser kartläggs. Områdets jordart, samt infrastruktur med specialkrav relaterade till markrörelser kartläggs.

- Bestämning av seismisk hasard och seismisk riskbedömning.

Den naturliga seismiska hasarden för området och den inducerade seismiska hasard verksamheten orsakar fastställs: områdets bakgrundsseismicitet kartläggs, en hasardbedömning görs (PSHA och/eller DSHA), den inducerade seismicitet orsakad av injiceringen av vatten uppskattas.

Utgående från hasarden görs en bedömning av den seismiska risken. Jordbävningskänsliga områden, byggnader och bosättning kartläggs.

3) Bedömning av miljökonsekvenser:

- Markanvändning, inverkan på områdets regionala geologi och eventuella naturobjekt.
- Konsekvenser för ytvattendrag och grundvatten.
- Hantering av borrhavsfall och damm, samt eventuellt radioaktivt material.
- Bullerförorening och vibrationer under byggfasen.

-
- Trafikarrangemang.
 - Hantering av kemikalier.
 - Utredning gällande anläggningens energieffektivitet och klimatesiliens.

4) Övervakning och beredskapsplan för anläggningens hela livscykel:

- Det rekommenderas att den myndighet som ansvarar för kraftverkets verksamhetsområde utser en oberoende övervakare för projektet. Övervakaren övervakar förverkligandet av det seismiska övervakningssystemet. Seismologiska institutet bör hållas informerat gällande projektets verksamhetsskeden.
- En beskrivning av det seismiska övervakningsnätet, analys- och trafikljussystemet samt leveransen av realtidsmaterialet till den övervakande instansen.
- En bedömning av miljöriskerna relaterade till verksamheten, beredskap inför miljöriskerna, samt en plan för hur man agerar i eventuella olyckssituationer.

5) Separata planer för byggnadsplatsområdet gällande borrhningen och driften av anläggningen:

- Användningen av byggområdet och aktiviteterna där beskrivs, de arbetshälsorelaterade riskerna identifieras och en plan för att minska riskerna läggs fram.
- Den planerade borrhntechniken och dess krav beskrivs, liksom de eventuella kemikalier som används under borrhningen och hur de hanteras.

6) En kommunikationsplan för kommunikationen med de olika myndigheterna och med allmänheten:

- De kontaktade aktörerna specificeras: de olika tillståndsmyndigheterna, övervakarna av seismiciteten (och eventuella andra övervakare), Seismologiska institutet, säkerhetsmyndigheterna, den lokala befolkningen och företagare, samt de vibrationskänsliga objekten.
- Kommunikationssätten med olika intressegrupper specificeras, dvs. hur man kommunicerar allmänt och vid undantagstillstånd.
- Informationsbehovet gällande påverkningsområdet, samt kommungränserna beaktas.

Källor

Källor på webben

FINLEX, Finlands lagstiftning uppdaterad: <https://www.finlex.fi/sv/laki/ajantasa/>

Motivas instruktioner om koldioxidberäkning (på finska):

https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan

St1 Deep Heat-projektets webbplats, www.st1.fi/geolampo, hämtad 15.8.2018

Pacific Northwest Seismic Network: Site Effects, www.pnsn.org/outreach/earthquakehazards/site-effects, hämtad 13.11.2018

Seismologiska institutets webbplats, www.helsinki.fi/fi/seismologian-instituutti

Riskanalysverktyget SELENA, www.norsar.no/r-d/safe-society/earthquake-hazard-risk/the-selena-open-risk-software/

Artiklar, böcker och rapporter

Ahjos, T. & Uski, M., 1992. Earthquakes in Northern Europe in 1375–1989. *Tectonophysics*, 207, 1–2, 1–23. Tillgänglig: [doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90469-M](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90469-M).

Arola, T., 2015. Groudwater as an Energy Resource in Finland. 2015. University of Helsinki – A36. Doctoral thesis. Unigrafia. Helsinki Finland.

Asanuma, H., Kumano, Y., Izumi, T., Soma, N., Kaieda, H., Tezuka, K., Wyborn, D. & Niitsuma, H. 2004. Passive seismic monitoring of a stimulation of HDR geothermal reservoir at Cooper Basin, Australia. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*: pp. 556–559, doi.org/10.1190/1.1845264

Baisch, S. & Harjes, H., 2003. A model for fluid-injection-induced seismicity at the KTB, Germany, *Geophysical Journal International*, Volume 152, Issue 1, Pages 160–170. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01837.x>

Bommer, J., Crowley, H. & Pinho, R., 2015. A risk-mitigation approach to the management of induced seismicity, *Journal of Seismology*, 19, 623–646.

Bommer, J., 2017. Predicting and Monitoring Ground Motions Induced by Hydraulic Fracturing. OGA-commissioned paper. Tillgänglig: www.ogauthority.co.uk/media/3693/pgv-thresholds-for-control-of-induced-seismic-hazard_v5.pdf

Bormann, P., 2002: New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), Potsdam: GeoForschungsZentrum Potsdam, IASPEI, Vol. 1–2 p.

Crowe, C., Masmonteil, J. & Thomas, R., 1992. Trends in matrix acidizing. *Oilfield review* 4, 24–40.

Cuenot, N., Scheiber, J., Moeckes, W. & Genter, A., 2015. Evolution of the Natural Radioactivity on the Soultz-sous-Forêt EGS Power Plant and Implication for Radiation Protection. *Proceedings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia.

Doelling, R & Schulte, I., 2010. Deep Groundsourced Heat Exchanger with Coaxial Pipe, Closed Water Circuit – Improvement Proposals in Project Development and Technical Pipe Conception, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*.

-
- EN 1998-1 (2004) (English): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.
- Evans, K., Zappone, A.S., Kraft, T., Deichmann, N. & Moia, F., 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO₂ reservoirs in Europe, *Geothermics* 41.
- Feder, T., 2018. Engineered geothermal systems have wide potential as a renewable energy source, *Physics today*, vol 71 (9). Tillgänglig: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.3.4017>
- Finger, J. & Blankenship, D., 2010. Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling, Sandia Report. Tillgänglig: www.energy.gov/eere/geothermal/downloads/handbook-best-practices-geothermal-drilling
- Foulger, G.R. & Julian, B.R., 2015. Non-double-couple earthquakes. I: *Encyclopedia of earthquake engineering*. Berlin; Heidelberg: Springer, pp. 1–31. DOI 10.1007/978-3-642-36197-5_290-1.
- Foxall, B., Lindsey, N. & Bachmann, C., 2015. Seismic Impacts Resulting from Well Stimulation, an Independent Scientific Assessment of Well Stimulation in California, Volume II: Potential Environmental Impacts of Hydraulic Fracturing and Acid Stimulations.
- Fülöp, L., Jussila V., Aapasuo R., Vuorinen T. & Mäntyniemi P., 2019. Evolving the Fennoscandian GMPEs, (EVOGY) Final report of the SAFIR2018 project.
- Galis M., Ampuero J.P., Mai P.M. & Cappa F., 2017. Induced seismicity provides insight into why earthquake ruptures stop. *Science Advances* 3: eaap7528. Tillgänglig: [dx.doi.org/10.1126/sciadv.aap7528](https://doi.org/10.1126/sciadv.aap7528)
- Gehlin, S. & Andersson, O., 2016. Geothermal Energy Use, Country Update for Sweden, European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 19–24 Sept 2016.
- Giardini D., Woessner J., Danciu L., Crowley H., Cotton F., Grünthal G., Pinho R., Valensise L. and the SHARE consortium, 2013. European Seismic Hazard Map for Peak Ground Acceleration, 10% Exceedance Probabilities in 50 years, doi: 10.2777/30345.
- Gischig, V. & Preisig, G., 2015. Hydro-fracturing versus hydro-shearing: A critical assessment of two distinct reservoir stimulation mechanisms, *Proceedings to the 13th International Congress of Rock Mechanics*, ISRM 2015, May 10–13 2015, Montréal, Canada.
- Gischig, V. & Wiemer, S., 2013. A stochastic model for induced seismicity based on non-linear pressure diffusion and irreversible permeability enhancement, *Geophysical Journal International* 194. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt164>
- Goebel, T. & Brodsky, E., 2018. The spatial footprint of injection wells in a global compilation of induced earthquake sequences. *Science* 361.
- Grigoli, F., Cesca, S., Rinaldi, A.P., Manconi, A., López-Comino, J.A., Clinton, J.F., Westaway, R., Cauzzi, C., Dahm, T. & Wiemer, S., 2018. The November 2017 M_w 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science* Vol. 360, Issue 6392, pp. 1003–1006. DOI: 10.1126/science.aat2010.
- Hagag, W. & Obermeyer, H., 2017. Active Structures in Central Upper Rhine Graben, SW Germany: New Data from Landau Area using Electromagnetic Radiation (EMR) Technique and Cerescope, *Journal of Geology and Geophysics* VOL. 6 (5). DOI: 10.4172/2381-8719.1000303.
- Häring, M.O., Schanz, U., Ladner, F. & Dyer, B.C., 2008. Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, Vol. 37, 469–495.
- Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., Ziegler, M. & WSM Team, 2016. World Stress Map Database Release 2016. GFZ Data Services. Tillgänglig: doi.org/10.5880/WSM.2016.001

-
- Hirschberg, S., Wiemer, S. & Burgherr, P., 2015. Energy from the Earth, Deep Geothermal as a Resource for the Future? TA Swiss Geothermal Project Final Report, Paul Scherrer Institute, Villigen.
Tillgänglig: biblio.parlament.ch/e-docs/378766.pdf
- Hogarth, R. & Holl, H., 2017. Lessons Learned from the Habanero EGS Project, GRC Transactions 41.
- IAEA, 2010. Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations. Specific safety guide. IAEA Safety Standards Series No. SSG-9, International Atomic Energy Agency, Vienna, 60 pp.
- Jung, R., 2013. EGS – Goodbye or Back to the Future, i boken Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, ed. Jeffrey, R. IntechOpen, DOI: 10.5772/56458. Tillgänglig: www.intechopen.com/books/effective-and-sustainable-hydraulic-fracturing/egs-goodbye-or-back-to-the-future-95
- Kaisko, O., 2018. st1 Deep Heat Oy, Seismicity and possible fault structures at the Otaniemi geothermal plant site. ÅF-Consult Ltd, Report DSTCATF-5810.
- Kijko, A., 2004. Estimation of the Maximum Earthquake Magnitude, Pure App.Geophys., vol.161, 1655-1681. DOI: 10.1007/s00024-004-2531-4.
- Kijko, A. & Sellevoll, M.A., 1989. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part I, Utilization of extreme and complete catalogues with different threshold magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am. 79, 645-654.
- Kijko, A. & Sellevoll, M.A., 1992. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II, Incorporation of magnitude heterogeneity, Bull. Seism. Soc. Am. 82, 120-134
- Kijko, A. & Singh, M., 2011. Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation, Acta Geophysica, vol. 59, p. 674-700
- Kim, K., Ree, J., Kim, Y., Kim, S., Kang, S. & Seo, W., 2018. Assessing whether the 2017 M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. Science Vol. 360, Issue 6392, pp. 1007-1009 DOI: 10.1126/science.aat6081.
- Korean Government Commission (2019). Summary Report of the Korean Government Commission on Relations between the 2017 Pohang Earthquake and EGS Project, March 20, 2019.
- Korja, A. (ed), Kosonen, E.M. (ed), Hellqvist, N.M., Koskinen, P.H., Mäntyniemi, P.B., Uski, M.R., Valtonen, O.S., Airo, M-L., Huotari-Halkosaari, T., Nironen, M., Sutinen, R., Grigull, S., Stephens, M., Karin, H. & Lund, B., 2015. Seismotectonic framework and seismic source area models in Fennoscandia, Northern Europe. Report S-63, Institute of Seismology, University of Helsinki, 284 pp.
- Kortström, J., Uski, M. & Tiira, T., 2016. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network, Computers & Geoscience, 87, 22–30, doi.org/10.1016/j.cageo.2015.11.006
- Kortström, J.T., Uski, M.R. & Oinonen, K.J., 2018. I: Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. 52, 1, 41-52.
- Koskinen, P., 2013. Orientations of faults and their potential reactivation in the present stress field in Finland. Opulicerad avhandling för magistersexamen. Helsingfors universitet, Avdelningen för fysik
- Kraft, T., Mai, P.M. Wiemer, S. Deichmann N., Ripperger, J., Kästli, P., Bachmann, C., Fäh, D., Wössner, J. & Giardini, D., 2009. Mitigating Risk for Enhanced Geothermal Systems in Urban Areas. EOS Trans. Am. Geophys. Union 90 (32), 237–264.
- Kukkonen, I., 2000. Geothermal energy in Finland, Proceedings World Geothermal Congress.

-
- Lautkankare, R., Salomaa, N., Arola, T. & Lehtonen, J., 2017. Thermal energy storages below the building helping to reach the 0-energy targets by 2020. Holistic approach through the energy simulations. Proceedings of the International Foundation Congress and Equipment Expo (IFCEE) 2018. Conference publication.
- Majer, E.L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., & Asanuma, H., 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36(3), 185–222.
- Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J. & Wong, I., 2012. Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems, United States Department of Energy: Geothermal Technologies Program.
- Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J. & Wong, I., 2014. Best Practices for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems (EGS), Lawrence Berkeley National Library. Tillgänglig: <https://escholarship.org/uc/item/3446g9cf>
- Mäntyniemi, P. & Wahlström, R., 2013. Macroseismic reports and intensity assessments for the earthquakes in the Bay of Bothnia area, northern Europe on 15 and 23 June 1882. Institute of Seismology, University of Helsinki, Report S-57, 88 pp.
- Mattila, J., 2015. Genesis and evolution of brittle structures in southwestern Finland and western South-Africa. Insights into fault reactivation, fluid flow and structural maturity in Precambrian craton, *Annales Universitatis Turkuensis AII 300*, Multiprint Oy, Turku, Finland, 32 pp.
- McGarr, A., 2014. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1008-1019, doi.org/10.1002/2013JB010597
- Mignan, A., Broccardo, M., Wiemer, S. & Giardini, D., 2018. Autonomous decision-making against induced seismicity in deep fluid injections. International Symposium on Energy Geotechnics 2018, Lausanne, Switzerland – SEG2018.
- Ojala, A.E.K., Mattila, J., Virtasalo, J., Kuva, J. & Luoto, T.P., 2018. Seismic deformation of varved sediments in southern Fennoscandia at 7400 cal BP. *Tectonophysics* 744, 58–71. Tillgänglig: doi.org/10.1016/j.tecto.2018.06.015
- Plenkers, K., Husen, S. & Kraft, T., 2015. A Multi-Step Assessment Scheme for Seismic Network Site Selection in Densely Populated Areas, *Journal of Seismology* 19(4), DOI: 10.1007/s10950-015-9500-5.
- Pokki, J., Aumo, R., Kananoja, T., Ahtola, T., Hyvärinen, J., Kallio, J., Kinnunen, K., Luodes, H., Sarapää, O., Selonen, O., Tuusjärvi, M., Törmänen, T. & Virtanen, K., 2014. Geologisten luonnonvarojen hyödyntäminen Suomessa vuonna 2012. Tutkimusraportti 210. Geologian tutkimuskeskus. Tillgänglig: tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_210.pdf
- Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 253-2010. Rakentamisen aiheuttamat tärinät. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 121 pp.
- Raymond, J., Mercier, S. & Nguyen, L., 2015. Designing coaxial ground heat exchangers with a thermally enhanced outer pipe. *Geothermal energy*, Vol. 3 (7).
- Saarno, T., Stl Deep Heat Oy, personlig kommunikation 2018.
- Shapiro, S., Dinske, C. & Kummerow, J., 2007. Probability of a given magnitude earthquake induced by a fluid injection, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22314, doi:10.1029/2007GL031615.
- Shapiro, S., Dinske, C. & Langenbruch, C., 2010. Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations, *The Leading Edge*, 29(3), 304-309. doi.org/10.1190/1.3353727.
- Schindler, M., 2007. Chronology of "holes and hints" in GPK4. Internal Report, GEIE.

- Stl Deep Heat, 2018(a). Otaniemi Geothermal Doublet, Traffic Light System for Seismic Monitoring, Ove Arup & Partners Ltd.
- Stl Deep Heat, 2018(b). Otaniemi Geothermal Doublet Implementation of Traffic Light System for Seismic Monitoring during OTN-III Well stimulation: Summary of Findings, Ove Arup & Partners Ltd.
- STUK 2017. Radioaktiivisten jätteiden ja päästöjen ryhmittely. Tillgänglig: www.stuk.fi/aiheet/ydinjatteet/radioaktiivisten-jatteiden-ja-paastojen-ryhmittely
- Talja, A., 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. VTT Tiedotteita 2569. Tillgänglig: www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2569.pdf
- Talja, A. & Törnqvist, J., 2014. Liikennetärinä: alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. Tutkimusraportti VTT-R-04703-14. Tillgänglig: www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04703-14.pdf
- Trutnevyte, E. & Wiemer, S., 2017. Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects: An application to Switzerland, *Geothermics* 65. doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.10.006
- Ungemach, P. & Antics, M., 2015. Assessment of Deep Seated Geothermal Reservoirs in Selected European Sedimentary Environments. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.
- Van der Elst, N.J., Page, M.T., Weiser, D.A., Goebel, T.H.W. & Hosseini, S.M., (2016), Induced earthquake magnitudes are as large as (statistically) expected, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 4575–4590, doi:10.1002/2016JB012818.
- Walters, R.J., Zoback, M.D., Baker, J.W. & Beroza, G.C., 2015. Characterizing and responding to seismic risk associated with earthquakes potentially triggered by fluid disposal and hydraulic fracturing. *Seismol. Res. Lett.*, Vol. 86, 1110–8.
- Wiemer, S., Kraft, T. & Lanftwing, D., 2015. Seismic risk, i publikationen: Hirschberg, S., Wiemer, S. & Burgherr, P. *Energy from the Earth, Deep Geothermal as a Resource for the Future? TA Swiss Geothermal Project Final Report*, Paul Scherrer Institute, Villingen, 263–295.
- Wiemer, S., Kraft, T., Trutnevyte, E. & Roth, P., 2017. Swiss Seismological Service: "Good Practice" Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland.
- Ympäristöministeriö. 2013. Energiakaivo – Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas.
- Ympäristöministeriö. 2014. Kaivosten ympäristöturvallisuus, Viranomaistyöryhmän loppuraportti, Ympäristöministeriön raportteja 3/2014.
- Zang, A, Oye, V., Jousset, P., Deichmann, N., Gritto, R., McGarr, A., Majer, E. & Bruhn, D., 2014, Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs – An overview, *Geothermics* 52.
- Zoback, M.D., Townend, J. & Grollimund, B., 2002. Steady-state failure equilibrium and deformation of intraplate lithosphere. *Int Geol Rev*, 44:383–401.

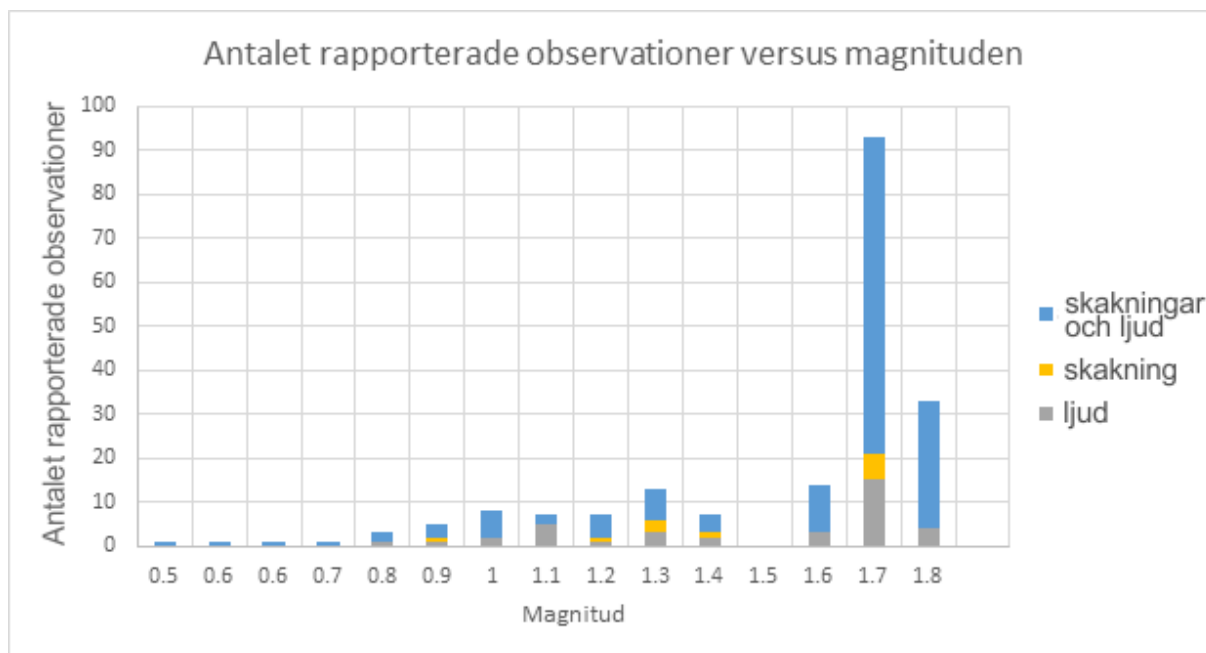
Mer om ämnet:

- Peura, J. 2017. Maanalaista Energiaa, Helsingin kaupungin Geoteknisen osaston julkaisu 97. [Tillgänglig: www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu97.pdf](http://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu97.pdf).
- Tester, J., Jaerson, B., Batchelor, A., Blackwell, D., DiPippo, R., Drake, E., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M., Nichols, K., Petty, S., Toksöz, N. & Veatch, R. (2006) "The Future of Geothermal Energy", Massachusetts Institute of Technology, ISBN: 0615134386, Tillgänglig: eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_geo_energy.pdf

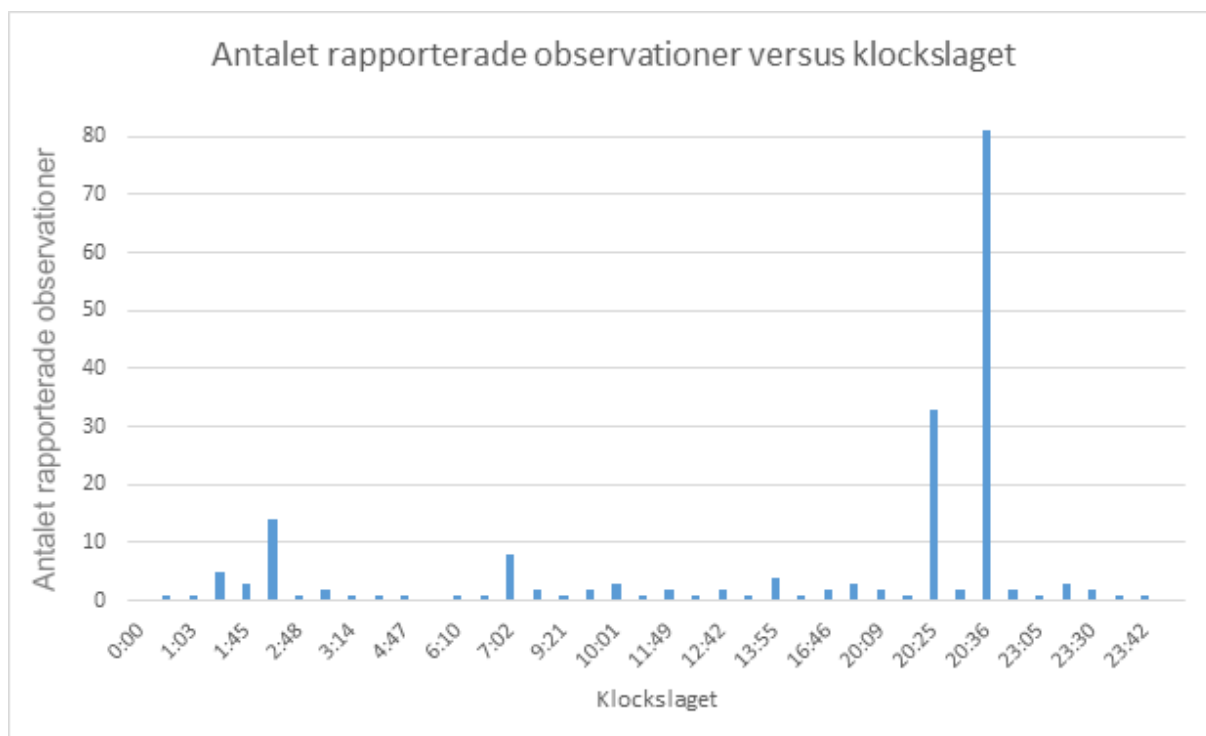
Bilagor

Bilaga 1: Data från observationsrapporter

Observationsrapporter inkomna till Seismologiska institutet under stimuleringsfasen i kraftverksprojektet i Otnäs.



Figur 16.



Figur 17.

Tabell 3: Rapport över jordbävningsobservationer under stimuleringen genom det första hålet i Otnäs.

Dag	Tid	Magnitud	Tot. antal observationer	Ljud	Vibrationer	Ljud och vibrationer
7.6.	23:42	1,0	1	0	0	1
9.6.	8:42	1,1	2	2	0	0
14.6.	3:22	1,0	1	1	0	0
20.6.	3:13	1,3	2	2	0	0
20.6.	2:27	1,6	14	3	0	11
21.6.	20:56	1,2	2	0	1	1
23.6.	9:21	1,1	1	0	0	1
23.6.	11:59	1,1	1	1	0	0
29.6.	7:02	1,7	8	1	0	7
29.6.	12:42	1,3	2	0	1	1
30.6.	9:53	1,4	2	1	0	1
3.7.	0:51	1,0	1	0	0	1
3.7.	23:11	1,0	3	1	0	2
3.7.	23:30	1,1	2	1	0	1
4.7.	3:14	1,0	1	0	0	1
4.7.	4:47	0,9	1	0	0	1
4.7.	6:46	1,0	1	0	0	1
5.7.	10:01	1,4	3	1	0	2
6.7.	11:49	1,4	2	0	1	1
7.7.	20:32	1,2	2	0	0	2
8.7.	10:09	0,6	1	0	0	1
8.7.	12:52	0,5	1	0	0	1
8.7.	20:36	1,7	81	13	6	62
12.7.	17:25	1,3	3	0	2	1
12.7.	23:36	0,9	1	0	1	0
13.7.	16:35	1,3	1	0	0	1
15.7.	23:05	0,7	1	0	0	1
16.7.	20:25	1,8	33	4	0	29
18.7.	20:09	0,8	2	0	0	2
19.7.	1:45	1,2	3	1	0	2
19.7.	13:55	1,7	4	1	0	3
21.7.	16:46	0,9	2	1	0	1
22.7.	6:10	0,8	1	1	0	0
22.7.	20:15	0,6	1	0	0	1
23.7.	1:03	0,9	1	0	0	1
24.7.	1:03	1,3	5	1	0	4
24.7.	2:48	1,1	1	1	0	0

Bilaga 2: GRID

Geothermal Risk of Induced seismicity Diagnosis (GRID) är ett i Schweiz utvecklat riskhanteringsverktyg för inducerad seismicitet. Det kan tillämpas i alla projekt gällande geotermisk energi där förhållandena liknar förhållandena i Schweiz (Trutnevyte & Wiemer 2017). GRID-processen kan användas i projektets alla faser, men den största nyttan har man av den i planeringsfasen. Systemet bygger på att geotermiska projekt poängsätts utifrån tre faktorer: 1) **Inducerad seismisk hasard**, som består av kraftverkets driftsparametrar samt av den seismiska hasarden i området. 2) **Övriga delområden av den seismiska risken**, dvs. bosättningen i området, områdets sårbarhet för jordbävningar, markens förstärkande effekt och infrastrukturens sårbarhet. Hit hör även sekundär hasard vilken kan ske efter en jordbävning – t.ex. jordskred, tsunamier, bränder. Till följd av det begränsade utrymmet talas det i tabellerna om risk, även om den seismiska hasarden inte ingår i den. 3) **Samhällelig respons**, vilken grundar sig på responsen från invånare och aktörer i området. GRID-poängsättningens olika faktorer med sina delområden enligt den ursprungliga modellen visas i tabell 4. För varje delområde ges 0–2 poäng. Schweiz har högre seismicitet än Finland, och den seismiska risken har beaktats i landets bygganvisningar. Anvisningen är således inte direkt tillämpbar i Finland. Vid bedömning av hasarden t.ex. utifrån bergarten erhålls alltid ett högt värde, eftersom jordlagret ovanpå berggrunden är tunt nästan överallt i Finland.

Poängen för den seismiska hasarden och risken summeras, och poängtalet jämförs enligt figur 18. Varje poäng för samhällelig respons ökar poängen för både seismisk hasard och risk med 0,5 enheter. Linjen i figur 18 visar hur stor vikt GRID-modellen lägger vid den samhälleliga responsen.

Tabell 4: Den schweiziska GRID-poängsättningens delområden. * I Finland nästan överallt 2.

** Klassificeringarna grundar sig på en schweizisk standard. I Finland finns ingen motsvarande standard.

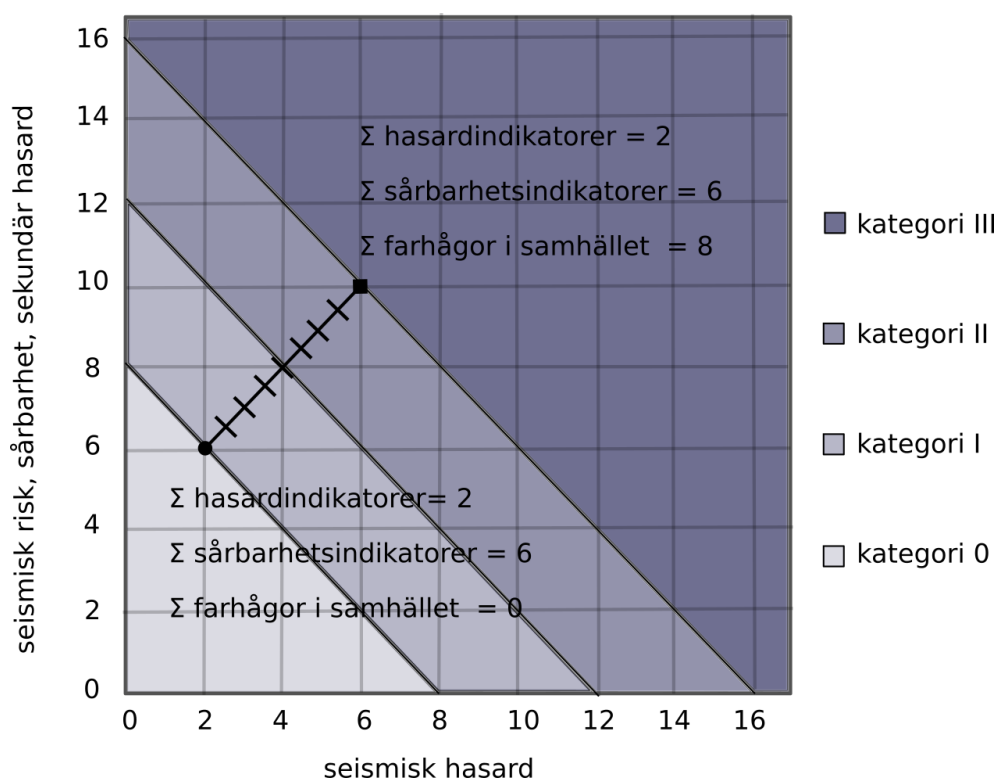
Tabellen bygger på förhållandena i Schweiz och är som sådan inte direkt tillämpbar på Finland.

poäng	0 (liten påverkan)	1 (medelstor påverkan)	2 (stor påverkan)
Seismisk hasard			
Värmereservoarens djup	<1 km	1–3 km	>3 km
Total injicerad volym under stimuleringen	<1000 m ³	1000–10 000 m ³	>10 000 m ³
In- eller utpumpning under driftfasen	<1000 m ³ /dygn pumpas in eller <5000 m ³ /dag pumpas ut	1000–10 000 m ³ /dygn pumpas in eller 5000–50000 m ³ /dygn pumpas ut	>10 000 m ³ /dygn pumpas in eller >50 000 m ³ /dygn pumpas ut
Bergart	Sediment / jordart	Inom 500 m från berggrunden	Kristallint berg / berggrund *

poäng	0 (liten påverkan)	1 (medelstor påverkan)	2 (stor påverkan)
Skillnaden mellan bakgrundsseismicitet och inducerad seismicitet **	$\leq 0,6 \text{ m/s}^2$ dimensioneringsvärde	$0,6\text{--}1,3 \text{ m/s}^2$ dimensioneringsvärde	$\geq 1,3 \text{ m/s}^2$ dimensioneringsvärde
Vätskans injiceringsstryck	$< 0,1 \text{ MPa}$	$0,1\text{--}1 \text{ MPa}$	$> 1 \text{ MPa}$
Avstånd från kända eller potentiellt aktiva förkastningar	$> 5 \text{ km}$	$2\text{--}5 \text{ km}$	$< 2 \text{ km}$
Seismisk risk, områdets utsatthet och sårbarhet, sekundära hasarder			
Lokal amplifikation inom en radie av 5 km	Inga byggnader eller infrastruktur på mjuk jordart	$< 10 \%$ av byggnaderna eller infrastrukturen på mjuk jordart	$\geq 10 \%$ av byggnaderna eller infrastrukturen på mjuk jordart
Utsatt befolkning inom en radie av 5 km	Glest befolkad: < 100 invånare	Glesbygd: $100\text{--}20\,000$ invånare	Stad: $> 20\,000$ invånare
Industri eller kommersiell verksamhet inom en radie av 5 km	Liten	Medelstor: ≥ 1 företag med $100\text{--}499$ anställda eller ≥ 1 industribyggnad	Aktiv: ≥ 5 företag med $100\text{--}499$ anställda eller > 1 företag med mer än 500 anställda eller ≥ 2 industribyggnader
Byggnadernas och infrastrukturens betydelse inom en radie av 5 km **	Inga byggnader av klass II eller III (<i>inga viktiga byggnader</i>)	Byggnader av klass II (<i>viktiga byggnader</i>)	Byggnader av klass III (<i>mycket viktiga byggnader</i>)
Infrastruktur med betydande miljörisk	Finns ej	–	En eller flera
Obekräftade historiskt värdefulla konstruktioner	$< 5 \%$ av byggnaderna	$5\text{--}10 \%$ av byggnaderna	$> 10 \%$ av byggnaderna eller internationellt sett viktigt världsarvsobjekt
Utsatthet för sekundär hasard inom en radie av 5 km	Mycket liten	Existerar	Stor
Samhällelig respons			
Farhågor i samhället	Inte alls	Existerar	Betydande
Intressentgruppernas utsatthet eller motstånd	Inte alls	Existerar	Betydande

poäng	0 (liten påverkan)	1 (medelstor påverkan)	2 (stor påverkan)
Negativa erfarenheter av motsvarande projekt	Inte alls	Existerar	Betydande
Förtroende saknas för verksamhetsutövaren eller myndigheterna	Inte alls	Existerar	Betydande
Fördelarna för det lokala samhället	Direkt fördel utan ekonomisk ersättning	Endast mot ersättning	Inga fördelar

Åtminstone tre aktörer bör delta i GRID-poängsättningen: verksamhetsutövaren, tillståndsmyndigheterna inom verksamhetsområdet, samt en eller flera oberoende experter. Projekten indelas på grundval av poängsättningen i fyra riskkategorier, för vilka det finns egna rekommendationer angående övervakning och kommunikation.



Figur 18: Diagram som visualiserar GRID-resultaten. Källa: Trutnevyte and Wiemer (2017, figur 2).

- **Kategori 0:** Den inducerade seismiska hasarden, risken och de sociala farhågorna är obefintliga eller mycket små, så det krävs ingen särskild seismisk övervakning. Typiska projekt i denna kategori är energibrunnar, samt slutna system där värmebärarvätskan inte är i kontakt med berget.
- **Kategori I:** Inducerade jordbävningar kan inträffa, men det är osannolikt att de orsakar skador och den sociala responsen är god. Typiska projekt i denna kategori är olika grunda projekt (0,5–

3 km) i befintliga akviferer långt från aktiva seismiska zoner eller förkastningar, som finns i områden med låg risk.

- **Kategori II:** Inducerade jordbävningar kan inträffa, både händelser som orsakar skador och sociala farhågor är möjliga. Typiska projekt i denna kategori är projekt där man borrar ner till olika djup, men där ingen stimulering ingår. Projektet genomförs dock i en riskzon eller så är den sociala responsen dålig.
- **Kategori III:** Inducerade jordbävningar är sannolika, både händelser som orsakar skador och sociala farhågor är möjliga och de kräver god riskhantering. Typiska projekt i denna kategori är projekt i vilka stimulering ingår, projekt där man borrar djupt eller i kristallint berg, samt projekt i seismiskt aktiva områden eller i närheten av aktiva förkastningar.

I tabell 5 ges en sammanfattning av de övervakningsrekommendationer som givits för Schweiz utifrån kategorierna. Tabellen bör anpassas efter förhållandena i varje enskilt land.

*Tabell 5: Sammanfattning av riskhanteringsrekommendationerna för de fyra kategorierna. Riskbedömningarna behandlas i rapportens kapitel 4.3. Kommunikationen behandlas i kapitel 5.4. Den seismiska övervakningen och trafikljussystemet behandlas i kapitel 4.4. * Med tvåvägsengagemang avses samråd med intressegrupperna. I den ursprungliga publikationen finns det mer information angående alla punkter.*

	Kategori 0	Kategori I	Kategori II	Kategori III
Preliminär hasard- och riskbedömning	behövs inte	empirisk, scenariobaserad bedömning	empirisk, scenariobaserad bedömning	sannolikhetsbaserad bedömning
Kartläggning av social respons	behövs inte	frivilligt	behövs	behövs
Informering angående inducerad seismicitet	behövs inte	behövs	behövs	behövs
Tvåvägs-engagemang *	behövs inte	frivilligt	behövs	behövs
Försäkring och ansvar	behövs inte	behövs	behövs	behövs
Förstärkning av konstruktioner	behövs inte	frivilligt	frivilligt	bör övervägas
Seismisk övervakning	behövs inte	en station	övervakningsnät	övervakningsnät
Trafikljussystem	behövs inte	frivilligt	obligatoriskt TLS	obligatoriskt anpassningsbart ATLS

ISSN 0357-3060
ISBN 978-952-10-9600-6 (PDF)
Helsingfors 2020